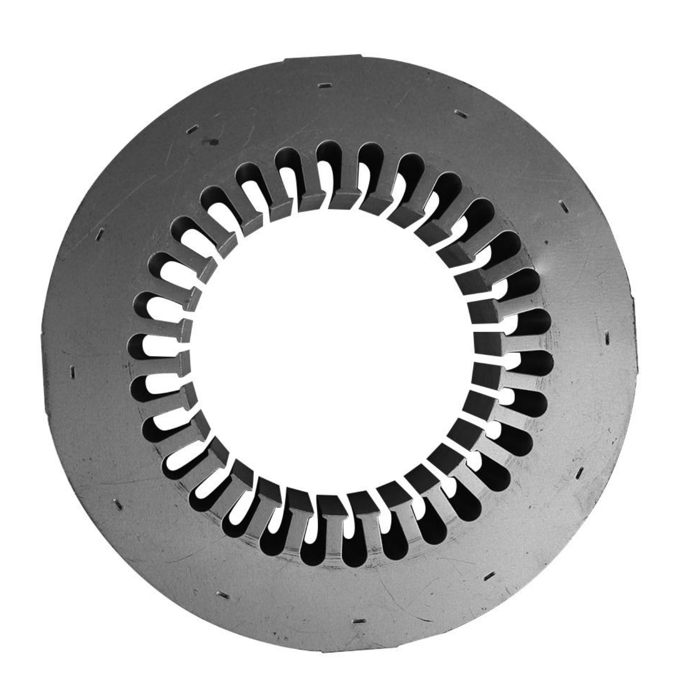
Пересчет обмотки асинхронного двигателя при ремонте



В настоящем документе представлена только часть указанного издания, касающаяся практического пересчета обмоток асинхронных двигателей при ремонте.

Маршак Евсей Львович

"Ремонт и модернизация асинхронных двигателей" 1970 г.

Rev. 02.   13 Oct 2020

Глава третья.
Поверочные расчеты и пересчеты обмоток.
3–1. Общие положения.

Поступающие в ремонт электродвигатели, как правило, имеют заводские паспортные щитки и обмотку, сохранившуюся в такой степени, что не составляет труда определить обмоточные данные электродвигателя. В большинстве случаев при ремонте требуется сохранить заводские параметры электродвигателя.

Электроремонтные цехи предприятий, а тем более специализированные электроремонтные заводы располагают альбомами обмоточных данных электродвигателей самых разнообразных типов и серий, как выпускаемых в настоящее время, так и снятых с производства, поэтому представляется весьма вероятным, что в альбомах содержатся обмоточные данные электродвигателя, подлежащего ремонту.

При отсутствии обмоточных данных в альбомах сохранение типа обмотки, ее схемы соединений, числа витков и размера провода без выполнения хотя бы сокращенного поверочного расчета было бы неправильным. При определении обмоточных данных электродвигателя могли быть допущены ошибки и без их учета перемотка была бы произведена по искаженным данным. Электродвигатель мог ремонтироваться ранее с отступлениями от заводских обмоточных данных, причем эти отступления могли быть недопустимыми.

Кроме того, при ремонте могут отсутствовать требуемые провода или изоляция, и хотя в этом случае отступления от заводского исполнения являются неизбежными, допустимость их должна быть технически обоснована.

Задачей поверочного расчета является проверка обмоточных данных и параметров ремонтируемого электродвигателя, Сопоставление его электромагнитных нагрузок с принятыми, допустимыми величинами.

При ремонтах, связанных с изменением напряжения и скорости вращения, задачей расчета является определение обмоточных данных для новых измененных параметров электродвигателя.

К обозначениям, относящимся к статору, прибавляется индекс 1 (например, число пазов статора обозначается z_1).

К обозначениям, относящимся к ротору, прибавляется индекс 2 (например, число пазов ротора обозначается z_2).

Буквенное обозначение величин, применяемых при поверочных расчетах и пересчетах электродвигателей, и их размерность указаны в табл. 3–1.

Таблица 3–1. Обозначения и размерности расчетных величин.

Обозначение	Наименование	Единица измерения
P	Номинальная мощность электродвигателя	*квт*
P'	Кажущаяся мощность электродвигателя	*ква*
f	Частота тока	*гц*
η	Коэффициент полезного действия (к. п. д.)	–
$\cos \varphi$	Коэффициент мощности	–
p	Число пар полюсов	–
nc	Синхронная скорость вращения	*об. мин*
n	Действительная скорость вращения	*об. мин*
S	Скольжение	%
Da	Наружный диаметр пакета стали	*см*
Di	Внутренний диаметр пакета стали	*см*

lt	Полная длина пакета стали	*см*
l	Активная длина пакета стали	*см*
$n_К$	Число радиальных вентиляционных каналов	–
$b_К$	Ширина радиального вентиляционного канала	*см*
$n'_К$	Число рядов аксиальных вентиляционных каналов	–
$d'_К$	Диаметр аксиального вентиляционного канала	*см*
k	Коэффициент заполнения пакета стали	–
z	Число пазов	–
tz	Зубцовый шаг	*см*
α	Число электрических градусов	*эл. град*
b	Расчетная ширина зубца	*см*
b'	Ширина зубца в самом узком месте	*см*
b''	Ширина зубца в самом широком месте	*см*
Q_S	Площадь сечения зубцов одного полюса	*см*^{2}
a	Ширина паза	*см*
hz	Высота паза	*см*
Q_Z	Площадь паза	*см*^{2}
ha	Высота тела пакета стали	*см*
τ	Длина полюсного деления	*см*
$Q\delta$	Площадь полюсного деления в зазоре	*см*^{2}
U	Линейное напряжение	*в*
$U_Ф$	Фазное напряжение	*в*
$I_Ф$	Ток в фазе	*а*
$I_{ХХ}$	Ток холостого хода электродвигателя	*а*
$I_С$	Ток в стержне короткозамкнутого ротора	*а*
$I_К$	Ток в замыкающем кольце короткозамкнутого ротора	*а*
w	Общее число витков в фазе	–
$w_{ЭФФ}$	Эффективное число витков в фазе	–
$S_{ЭФФ}$	Эффективное число проводников в пазе	–
$Q_{ЭФФ}$	Площадь сечения эффективного провода	*мм*^{2}
$q_Э$	Площадь сечения элементарного проводника	*мм*^{2}
m	Число элементарных проводников	–
d	Диаметр неизолированного провода	*мм*
$d_{ИЗ}$	Диаметр изолированного провода	*мм*
a	Число параллельных ветвей в фазе	–
y	Шаг обмотки	–
q	Число пазов на полюс и фазу	–
$k\beta$	Обмоточный коэффициент	–
$B\delta$	Индукция в воздушном зазоре	*тл*
Ba	Индукция в теле пакета стали	*тл*
$B_З$	Индукция в зубцах	*тл*
j	Плотность тока	*а/мм*^{2}
A	Линейная нагрузка	*а/мм*
$\rho м$	Удельное сопротивление меди	*ом×мм*^{2}*/м*
ρa	Удельное сопротивление алюминия	*ом×мм*^{2}*/м*

3–2. Поверочный расчет статора электродвигателя.

На основании паспортных и обмоточных данных, а также снятых с натуры размеров электродвигателя определяются следующие необходимые для расчета величины.
1. Число полюсов электродвигателя:

$$2p = \frac{120 \times f}{nc} \quad (3-1)$$

где: f – частота тока в питающей сети, *гц*, nc – синхронная скорость вращения электродвигателя (скорость вращения магнитного поля статора). Для принятой в СССР для промышленных целей частоты 50 *гц*:

$$2p = \frac{6000}{nc} \quad (3-2)$$

На паспортном щитке электродвигателя указывается не синхронная скорость вращения, а действительная n отличающаяся от синхронной на величину скольжения. Скольжение при номинальной мощности электродвигателя выражается в процентах по отношению к синхронной скорости:

$$s = \frac{nc - n}{nc} \times 100\% \quad (3-3)$$

и составляет в зависимости от мощности электродвигателя 1,5–5%. Таким образом, для определения числа полюсов следует частное от деления 6000 на число, указывающее действительную скорость вращения, уменьшить на 1,5–5% до ближайшего целого четного числа.
2. Полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi \times Di_1}{2p} \text{ см} \quad (3-4)$$

где: Di_1 – внутренний диаметр статора (диаметр расточки), *см.*

3. Зубцовый шаг:

$$tz_1 = \frac{\pi \times Di_1}{z_1} \text{ см} \quad (3-5)$$

где: z_1 – число пазов статора.
4. Активная длина пакета статора:

$$l_1 = k_1 \times (lt_1 - n\text{к}_1 \times b\text{к}_1) \text{ см} \quad (3-6)$$

где: lt_1 – полная длина пакета стали (включая радиальные вентиляционные каналы), *см*. $n\text{к}_1$ – число вентиляционных каналов; $b\text{к}_1$ – ширина вентиляционного канала, *см*. k_1 – коэффициент заполнения пакета стали, зависящий от толщины листов, вида межлистовой изоляции, а также учитывающий не плотное прилегание листов друг к другу. Значение коэффициента k_1 приведено в табл. 3–2.
5. Площадь паза Q_{Z1}, $см^2$. Наиболее распространенные формы пазов и формулы для определения их площадей приведены па рис. 3–1.

6. Расчетная ширина зубца:
а) для зубца переменного сечения:

$$b_1 = \frac{2}{3} \times b_1' + \frac{1}{3} \times b_1'' \text{ см} \quad (3-7)$$

где: b'_1 – ширина зубца в самом узком месте, *см*, b''_1 – ширина зубца в самом широком месте, *см*.

б) для зубца трапецеидальной формы (при пазе постоянного сечения, т. е. при пазе с параллельными боковыми стенками):

$$b_1 = \frac{\pi \times \left(Di_1 + \frac{2}{3} \times hz_1\right)}{z_1} - a_1 \text{ см } (3-8)$$

где: hz_1 – высота паза, *см*. Di_1 – внутренний диаметр статора (диаметр расточки), *см*. a_1 – ширина паза, *см.*

Таблица 3–2. Значение коэффициента заполнения пакета стали.

Толщина листов статора, *мм*	Род изоляции листов		
	Бумага	Лак	Без изоляции или с оксидной изоляцией
0,5	0,9	0,93	0,95
0,35	0,87	0,91	0,93

7. Высота спинки:

$$ha_1 = \frac{Da_1 - Di_1}{2} - hz_1 \ (3-9)$$

где: Da_1 – наружный диаметр пакета стали, *см.* Di_1 – внутренний диаметр статора (диаметр расточки), *см.*, hz_1 – высота паза.

8. Площадь полюсного деления (площадь поперечного сечения зазора):

$$Q\delta = \tau \times lt_1 \text{ см}^2 \ (3-10)$$

9. Площадь сечения спинки:

$$Qa_1 = ha_1 \times l_1 \text{ см}^2 \ (3-11)$$

Если в пакете стали имеются аксиальные каналы, то:

$$Qa_1 = \left(ha_1 - \frac{2}{3} \times n\text{к}' \times d\text{к}'\right) \times l_1 \text{ см}^2 \ (3-12)$$

где: $n\text{к}'$ –число рядов аксиальных каналов; $d\text{к}'$ – диаметр канала, *см.*

10. Площадь сечения зубцов одного полюса:

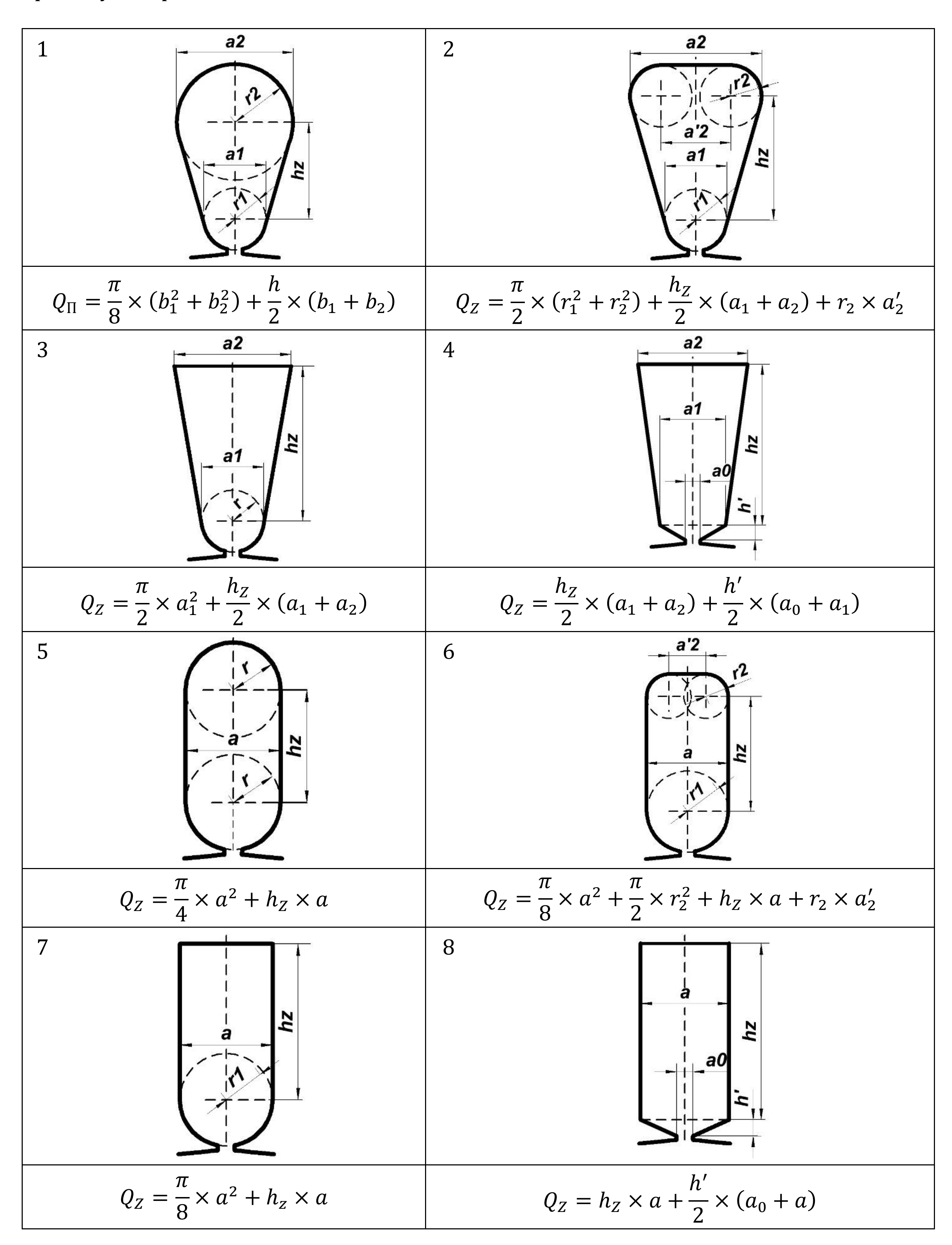
$$Q\text{з}_1 = \frac{z_1 \times b_1}{2p} \times l_1 \text{ см}^2 \ (3-13)$$

Как указывалось выше, задачей поверочного расчета является определение электромагнитных нагрузок и сравнение их с допустимыми. Для статора характерными величинами являются:

$B\delta$ – индукция в воздушном зазоре, *тл;*
Ba_1–индукция в спинке, *тл;*
$B\text{з}_1$ – индукция в зубцах, *тл;*
j_1 – плотность тока, $а/мм^2$;
A_1 – линейная нагрузка, *а/см;*
K'_1 – коэффициент заполнения свободного сечения паза.

Значения электромагнитных нагрузок для асинхронных двигателей в зависимости от их мощности указаны в табл. 3–3.

Если в результате поверочного расчета будет установлено, что электромагнитные нагрузки находятся в допустимых пределах, можно при ремонте полностью копировать старую обмотку. Большое отклонение вычисленных нагрузок от допустимых может быть результатом ошибок при изготовлении электродвигателя на заводе или при его предыдущем ремонте.



1	2
$Q_{П} = \frac{\pi}{8} \times (b_1^2 + b_2^2) + \frac{h}{2} \times (b_1 + b_2)$	$Q_Z = \frac{\pi}{2} \times (r_1^2 + r_2^2) + \frac{h_Z}{2} \times (a_1 + a_2) + r_2 \times a_2'$
3	4
$Q_Z = \frac{\pi}{2} \times a_1^2 + \frac{h_Z}{2} \times (a_1 + a_2)$	$Q_Z = \frac{h_Z}{2} \times (a_1 + a_2) + \frac{h'}{2} \times (a_0 + a_1)$
5	6
$Q_Z = \frac{\pi}{4} \times a^2 + h_Z \times a$	$Q_Z = \frac{\pi}{8} \times a^2 + \frac{\pi}{2} \times r_2^2 + h_Z \times a + r_2 \times a_2'$
7	8
$Q_Z = \frac{\pi}{8} \times a^2 + h_z \times a$	$Q_Z = h_Z \times a + \frac{h'}{2} \times (a_0 + a)$

Рис. 34. Наиболее распространенные формы пазов (число π = 3,14159)

Таблица 3–3. Значение электромагнитных нагрузок для асинхронных двигателей

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Мощность, *квт*.			
			Свыше 100	10–100	1–10	до 1
Индукция в воздушном зазоре	$B\delta$	*тл*	1,0–0,9	0,9–0,7	0,7–0,6	0,6–0,3
Индукция в спинке статора	Bа$_1$	–	1,7–1,4	1,6–1,3	1,6–1,2	1,5–1,1
Индукция в спинке ротора	Bа$_2$	–	1,4–1,2	1,3–1,2	1,2–1,0	1,1–0,9
Индукция в зубцах статора	Bз$_1$	–	2,0–1,8	1,8–1,4	1,6–1,4	1,5–1,3
Индукция в зубцах ротора	Bз$_2$	–	1,8–1,6	1,6–1,4	1,4–1,3	1,3–1,1
Плотность тока в обмотке статора	j_1	*а/мм*^{2}	5–3	5,5–4	6–5	8–6
Плотность тока в фазовой обмотке ротора	j_2	–	5,5–5	6–5,5	–	–
Плотность тока в стержнях короткозамкнутого ротора	jc	–	7,0–5,5	8,0–7,0	8,5–8,0	9,0–8,5
Плотность тока в замыкающем кольце короткозамкнутого ротора	jk	–	5,0–4,0	5,5–5,0	6,0–5,5	7,0–6,5
Линейная нагрузка обмотки статора	A_1	*а/см*	350–600	250–400	200–300	100–200
Коэффициент заполнения свободного сечения паза статора	K'_1	–	0,65–0,70 для медного провода 0,70–0,75 для алюминиевого провода			
Произведение плотности тока на линейную нагрузку обмотки статора	$j_1 \times A_1$	–	–	2000	–	1700

Не исключена возможность, что паспорт и обмоточные данные не соответствуют друг другу из–за того, что предыдущий ремонт электродвигателя производился с изменением номинальных параметров, но это не было отражено на заводском щитке. Также возможно, что завод–изготовитель по какой–либо производственной причине намеренно отошел от оптимального технического решения. Одной из таких причин может быть желание использовать существующие вырубные штампы от какой–нибудь определенной машины для штамповки листов стали к другой электрической машине с близкими, но не полностью совпадающими параметрами.

Расчетные формулы.

1. Индукция в воздушном зазоре:

$$B\delta = \frac{2{,}5 \times p \times U_{\Phi 1} \times a_1}{lt_1 \times z_1 \times Di_1 \times S_{ЭФФ} \times k\beta_1} \times 10^2 \text{ тл} \quad (3-14)$$

$$U_{\Phi 1} = U \text{ при соединении фаз в треугольник, в;} \quad (3-15)$$

$$U_{\Phi 1} = \frac{U}{\sqrt{3}} \text{ при соединении фаз в звезду, в;} \quad (3-16)$$

где: U – линейное напряжение, подводимое для питания электродвигателя; $U_{\Phi 1}$ фазное напряжение, *в*; $k\beta_1$ –обмоточный коэффициент,

Величина обмоточного коэффициента зависит от числа пазов, приходящихся на полюс и фазу q_1, и от шага обмотки y_1. Для наиболее употребительных шагов значение обмоточного коэффициента приведено в табл. 3–4.

$S_{ЭФФ1}$ – число эффективных проводов в пазе:

$$S_{ЭФФ_1} = \frac{6 \times w_{ЭФФ_1} \times a_1}{z_1} = \frac{6 \times w_{об1}}{z_1} \quad (3-17)$$

$w_{об1}$ – общее число витков в фазе; a_1 – число параллельных ветвей в фазе.
$w_{ЭФФ1}$ – число эффективных (последовательно соединенных) витков в фазе.

Таблица 3–4. Значение обмоточных коэффициентов трехфазной обмотки.

Число катушек в катушечной группе	Сокращение шага обмотки в долях единицы				
	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75
	Обмоточный коэффициент $k\beta$				
1	0,997	0,988	0,972	0,951	0,924
2	0,963	0,954	0,939	0,919	0,893
3	0,957	0,948	0,933	0,913	0,887
4	0,955	0,947	0,931	0,911	0,885
5–7	0,954	0,946	0,930	0,910	0,884
8	0,953	0,945	0,929	0,909	0,883
9 и более	0,952	0,944	0,928	0,908	0,882
Число катушек в катушечной группе	Сокращение шага обмотки в долях единицы				
	0,70	0,65	0,60	0,55	0,5
	Обмоточный коэффициент $k\beta$				
1	0,891	0,853	0,809	0,760	0,700
2	0,861	0,824	0,781	0,734	0,676
3	0,855	0,819	0,779	0,730	0,672
4	0,854	0,817	0,777	0,728	0,671
5–7	0,853	0,816	0,774	0,727	0,670
8	0,852	0,815	0,773	0,727	0,669
9 и более	0,851	0,815	0,773	0,726	0,668

Для промежуточных значений сокращения шага обмотки коэффициент определяется интерполяцией или по формуле:

$$k\beta_1 = sin\left(\frac{y_1}{\tau} \times 90^o\right) \times \frac{0,5}{q_1 \times sin\frac{30^o}{q_1}} \quad (3-18)$$

2. Индукция в зубцах, где: tz_1 – зубцовый шаг:

$$Bз_1 = B\delta \times \frac{tz_1}{b_1} \times \frac{lt_1}{l_1} \text{ тл} \quad (3-19)$$

3. Индукция в спинке:

$$Ba_1 = 0,55 \times B\delta \times \frac{Di_1}{ha_1} \times \frac{lt_1}{l_1} \times \frac{1}{p} \text{ тл} \quad (3-20)$$

4. Плотность тока, *а/мм²*:

$$j_1 = \frac{I_{\Phi 1}}{Q_{ЭФФ_1} \times a_1} = \frac{I_{\Phi 1}}{qэ_1 \times m_1 \times a_1} \quad (3-21)$$

где: $Q_{ЭФФ1}$ – площадь сечения эффективного провода в пазе, *мм*²,
$q_{Э1}$ – площадь сечения элементарного проводника, *мм*²,
m_1 –число элементарных проводников в эффективном проводе паза;
$I_{\Phi 1}$ – номинальный ток в фазе, *а*,

$$I_{\Phi 1} = \frac{P \times 1000}{\sqrt{3} \times U \times \eta \times \cos\varphi} \ a - \text{ при соединении фаз в звезду} \quad (3-22)$$

$$I_{\Phi 1} = \frac{P \times 1000}{3 \times U \times \eta \times \cos\varphi} \ a - \text{ при соединении фаз в треугольник} \quad (3-23)$$

P – номинальная мощность электродвигателя (мощность на валу), *квт*,
η – коэффициент полезного действия; cos φ – коэффициент мощности.

Для приближенного определения значений cos φ и η, если они не указаны на заводском паспортном щитке, можно пользоваться табл. 3–5 – 3–8.

5. Линейная нагрузка:

$$A_1 = \frac{I_{\Phi 1} \times z_1 \times S_{ЭФФ1}}{\pi \times Di_1 \times a_1} \ a/\text{см} \quad (3-24)$$

Одним из факторов, определяющих нагрев электродвигателя, является произведение $j_1 \times A_1$ Его допустимое значение, приведенное в табл. 3–3, относится к электродвигателям с обмоткой из медного провода. Для электродвигателей с алюминиевой обмоткой допустимое значение $j_1 \times A_1$ обычно принимают на 15–20% ниже.

Таблица 3–5. Коэффициенты полезного действия и мощности электродвигателей защищенного исполнения с короткозамкнутым ротором.

Мощность, *квт*	η, %				cos φ			
	при скорости вращения (синхронной), *об. мин*.							
	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
0,6	–	74,0	–	–	–	0,76	–	–
1,0	79,0	78,5	77,0	–	0,86	0,79	0,72	–
1,7	81,5	81,5	79,5	–	0,87	0,82	0,75	–
2,8	84,0	83,5	82,5	–	0,88	0,84	0,78	–
4,5	85,5	85,5	84,5	83,5	0,88	0,85	0,80	0,76
7	87,0	87,0	86,0	85,0	0,89	0,86	0,81	0,78
10	87,5	87,5	86,5	85,0	0,89	0,88	0,82	0,80
14	87,5	88,5	87,0	87,0	0,89	0,88	0,83	0,81
20	88,5	89,0	88,0	88,0	0,90	0,88	0,84	0,82
28	89,0	90,0	89,0	89,0	0,90	0,88	0,85	0,83
40	90,0	90,5	90,0	90,0	0,91	0,89	0,86	0,84
55	90,5	91,0	91,0	91,0	0,91	0,89	0,87	0,84
75	91,0	91,5	92,5	–	0,91	0,89	0,88	–
100	91,5	92,0	–	–	0,92	0,89	–	–

Таблица 3–6. Коэффициенты полезного действия и мощности закрытых обдуваемых электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

Мощность, *квт*	η, %				cos φ			
	при скорости вращения (синхронной), *об. мин.*							
	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
0,6	76,0	74,0			0,85	0,76		
1,0	79,0	78,5	77,0	–	0,86	0,79	0,72	–
1,7	81,5	81,5	79,5	–	0,87	0,82	0,75	–
2,8	84,0	83,5	82,5	–	0,88	0,84	0,78	–
4,5	85,5	85,5	84,5	84,5	0,88	0,85	0,80	0,76
7,0	87,5	87,0	86,0	86,0	0,89	0,86	0,81	0,78
10	87,5	87,5	87,0	87,0	0,89	0,88	0,82	0,80
14	88,0	88,5	88,0	87,5	0,90	0,88	0,83	0,81
20	88,5	89,0	88,5	88,0	0,90	0,88	0,84	0,82
28	89,5	90,0	89,0	89,0	0,91	0,88	0,86	0,83
40	89,5	90,5	90,0	90,0	0,91	0,89	0,87	0,84
55	90,0	91,0	91,0	91,0	0,92	0,89	0,88	0,84
75	90,5	91,5	92,0	–	0,92	0,90	0,89	–
100	91,0	92,0	–	–	0,92	0,90	–	–

Таблица 3–7. Коэффициенты полезного действия и мощности электродвигателей защищенного исполнения с фазовым ротором.

Мощность, *квт*	η, %			cos φ		
	при скорости вращения (синхронной) *об. мин*.					
	1500	1000	750	1500	1000	750
1,7		72,5			0,72	
2,8	78,0	75,5	–	0,82	0,74	–
4,5	80,0	78,5	76,5	0,83	0,76	0,72
7	82,0	81,0	79,5	0,84	0,78	0,74
10	83,5	82,5	81,5	0,85	0,79	0,76
14	84,5	84,0	83,0	0,86	0,80	0,77
20	86,0	85,0	84,5	0,86	0,81	0,79
28	87,0	86,5	86,0	0,87	0,82	0,80
40	88,0	87,5	87,5	0,87	0,83	0,81
55	89,0	88,5	88,5	0,87	0,83	0,82
75	90,0	89,5	–	0,88	0,84	–
100	90,5	–	–	0,88	–	–

6. Коэффициент заполнения паза.

Переходя к определению коэффициента заполнения паза, следует отметить, что в технической литературе по этому вопросу нет единого мнения. Некоторыми авторами коэффициент заполнения паза определяется как отношение площади сечения всех неизолированных проводов, заложенных в паз, ко всей площади паза:

$$K_1 = \frac{S_{\text{ЭФФ}1} \times Q_{\text{ЭФФ}1}}{Q_{Z1}} \quad (3-25)$$

Таблица 3–8. Коэффициенты полезного действия и мощности взрывобезопасных электродвигателей.

Мощность, *квт*	η, %			cos φ		
	при скорости вращения (синхронной), *об. мин.*					
	1500	1000	750	1500	1000	750
1,7		72,5			0,72	
2,8	78,0	75,5	–	0,82	0,74	–
4,5	80,0	78,5	76,5	0,83	0,76	0,72
7,0	82,0	81,0	79,5	0,84	0,78	0,74
10	83,5	82,5	81,5	0,85	0,79	0,76
14	84,5	84,0	83,0	0,86	0,80	0,77
20	86,0	85,0	84,5	0,86	0,81	0,79
28	87,0	86,5	86,0	0,87	0,82	0,80
40	88,0	87,5	87,5	0,87	0,83	0,81
55	89,0	88,5	88,5	0,87	0,83	0,82
75	90,0	89,5	–	0,88	0,84	–
100	90,5	–	–	0,88	–	–

Другие авторы этот коэффициент определяют как отношение площади сечения всех изолированных проводов, заложенных в паз, к площади паза. Коэффициент заполнения паза определяется также как отношение площади сечения всех изолированных проводов, заложенных в паз, к свободному сечению паза (т. е. к площади паза за вычетом площадей, занимаемых клином, межслоевой прокладкой и пазовой изоляцией). Определение коэффициента заполнения паза является очень ответственной частью расчета, непосредственно влияющей на конечные результаты; к его выбору следует отнестись очень серьезно, проанализировав все влияющие на него факторы. Указанный в формуле (3–25) коэффициент может быть представлен как произведение трех частных коэффициентов:

$$K_1 = K_1' \times K_1'' \times K_1''' \quad (3-26)$$

Коэффициент заполнения провода K_1''', представляет собой отношение площади сечения неизолированного провода к площади прямоугольника, описанного вокруг изолированного провода. Для круглых проводов:

$$K_1''' = \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{d_1}{d_{\text{И}31}}\right)^2 \quad (3-27)$$

где: d_1 – диаметр неизолированного провода, *мм.*, $d_{\text{И}31}$ – диаметр изолированного провода, *мм*. С уменьшением толщины изоляции и увеличением диаметра провода этот коэффициент возрастает. Изменяется K_1''' в значительных пределах: например для провода марки ПБД диаметром 0,5 *мм.* он составляет 0,38, а для такого же провода марки ПЭВ–2 равен 0,71. В каждом отдельном случае этот коэффициент может быть точно определен по соответствующим таблицам обмоточных проводов. Коэффициент свободного сечения паза K_1''' представляет собой отношение свободной площади паза, т. е. всей площади паза в свету, за исключением площадей, занимаемых клином, межслоевой прокладкой и пазовой изоляцией, к площади паза в свету. Коэффициент зависит от номинального напряжения электродвигателя – с увеличением напряжения он уменьшается; от типа обмотки, так как при однослойной обмотке межслоевые прокладки отсутствуют; от электроизоляционных качеств материалов пазовой изоляции, т. е. от ее толщины, и, наконец, от конфигурации паза; при одной и той же площади паза для узких глубоких пазов этот коэффициент меньше, чем для широких неглубоких.

Для электродвигателей напряжением до 500 *в* и мощностью до 100 *квт* величина коэффициента K_1" составляет 0,7–0,8. Для крупных электродвигателей напряжением 3 *кв* и выше этот коэффициент равен 0,6–0,75. В каждом отдельном случае коэффициент свободного сечения паза легко определяется с достаточной степенью точности путем нанесения на эскиз паза его изоляции и прокладок и вычисления площади, занимаемой этой изоляцией. Коэффициент заполнения свободного сечения паза K_1' есть отношение суммы площадей прямоугольников, описанных вокруг всех проводов, заложенных в паз, к свободному сечению паза. Коэффициент K_1' зависит как от толщины и материала проводов, так и от квалификации обмотчиков производящих укладку проводов. Изменяется коэффициент K_1' в зависимости от указанных факторов в пределах 0,65–0,70 для медных обмоток и в пределах 0,70–0,75 для алюминиевых обмоток. Повышение этого коэффициента сверх указанной величины влечет за собой повреждение витковой изоляции.

3–3. Поверочный расчет ротора электродвигателя с фазовой обмоткой.

Аналогично для ротора, как и для статора, на основании обмоточных данных и снятых с натуры размеров определяются следующие необходимые для расчета величины.
1. Зубцовый шаг:

$$tz_2 = \frac{\pi \times Da_2}{z_2} \text{ см } (3-28)$$

где: Da_2 – наружный диаметр ротора, см; z_2 – число пазов ротора.
2. Активная длина пакета стали:

$$l_2 = k_1 \times (lt_2 - n\text{к}_2 \times b\text{к}_2) \text{ см. } (3-29)$$

lt_2 – полная длина пакета стали (включая радиальные вентиляционные каналы), *см*;
$n\text{к}_2$ – число вентиляционных каналов; $b\text{к}_2$ – ширина вентиляционного канала, *см.*;
k_1 – коэффициент заполнения пакета стали согласно табл. 3–2.
3. Площадь паза Q_{Z2}, $см^2$. Наиболее распространенными являются пазы с параллельными боковыми стенками. Определение их площади не представляет труда.
4. Расчетная ширина зубца: а) для зубца переменного сечения:

$$b_2 = \frac{2}{3} \times b_2' + \frac{1}{3} \times b_2'' \text{ см } (3-30)$$

где: b_2' – ширина зубца в самом широком месте, см; b_2" – ширина зубца в самом узком месте, *см.*;

б) для зубца трапецеидальной формы:

$$b_2 = \frac{\pi \times \left(Da_2 - \frac{2}{3} \times hz_2\right)}{z_2} - a_2 \quad (3-31)$$

где: hz_2 – высота паза, *см.*; a_2 – ширина паза, см; Da_2 – наружный диаметр ротора, *см*.

$$Da_2 = Di_1 - 2 \times \delta \text{ см. } (3-32)$$

δ – воздушный зазор между статором и ротором, *см*.

5. Высота тела ротора:

$$ha_2 = \frac{Da_2 - Di_2}{2} - hz_2 \text{ см. } (3-33)$$

где: Di_2 – внутренний диаметр ротора, *см*.

У электродвигателей малой мощности пакет стали ротора насаживается непосредственно на вал и, таким образом, внутренний диаметр ротора равен диаметру вала. Если ротор в месте посадки на вал имеет вентиляционные каналы (рис. 3–2), то при расчетах за внутренний диаметр ротора принимают диаметр окружности, описанный вокруг этих каналов.

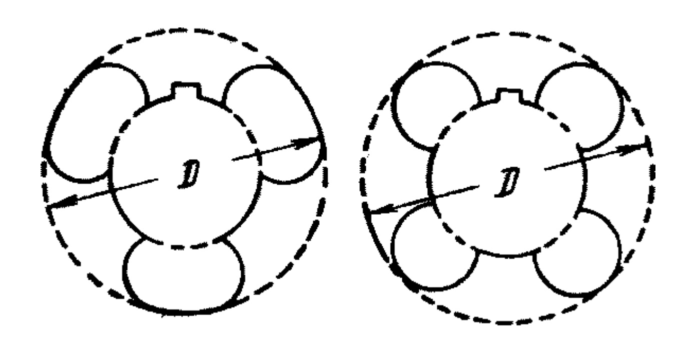


Рис. 3–2. Фигурные вентиляционные каналы.

6. Площадь сечения тела ротора:

$$Qa_2 = ha_2 \times l_2 \text{ см.} \quad (3\text{–}34)$$

7. Площадь сечения зубцов одного полюса:

$$Qз_2 = \frac{z_2 \times bz_2}{2p} \times l_2 \text{ см}^2 \quad (3-35)$$

Расчетные формулы.

1. Индукция в зубцах:

$$Bz_2 = B\delta \times \frac{tz_2}{b_2} \times \frac{lt_2}{l_2} \text{ тл} \quad (3-36)$$

где: tz_2 – зубцовый шаг.
2. Индукция в теле (спинке) ротора:

$$B\text{a}_1 = 0{,}55 \times B\delta \times \frac{D\text{a}_2}{ha_2} \times \frac{lt_2}{l_2} \times \frac{1}{p} \text{ тл} \quad (3-37)$$

3. Фазовое напряжение:

$$U_{\Phi 2} = U_{\Phi 1} \times \frac{S_{\text{эфф2}} \times z_2 \times k\beta_2 \times a_1}{S_{\text{эфф1}} \times z_1 \times k\beta_1 \times a_2} \text{ в} \quad (3-38)$$

где: $S_{\text{эфф2}}$–число эффективных проводов в пазе:

$$S_{\text{эфф2}} = \frac{6 \times w_{\text{эфф2}} \times a_2}{z_2} = \frac{6 \times w_{\text{об2}}}{z_2} \quad (3-39)$$

где: $w_{\text{об2}}$ – общее число витков в фазе; a_2– число параллельных ветвей в фазе; $w_{\text{эфф2}}$ – число эффективных витков в фазе; $k\beta_2$ – обмоточный коэффициент согласно табл. 3–4.
4. Напряжение между кольцами:

$$U_2 = U_{\Phi 2} \text{ при соединении фаз в треугольник, в } (3-40)$$
$$U_2 = \sqrt{3} \times U_{\Phi 2} - \text{ при соединении фаз в звезду, в } (3-41)$$

Напряжение между кольцами ротора не нормируется, но его величина определяет уровень изоляции узла контактных колец.

В электродвигателях мощностью до 15 *квт* напряжение между кольцами находится в пределах 200–250 *в*, в электродвигателях до 50 *квт* – в пределах 350 *в*, а в крупных электродвигателях оно достигает 1000 *в* и более. Для снижения напряжения между кольцами фазы обмотки соединяются в треугольник или обмотка выполняется двумя параллельными ветвями. Величина тока, снимаемого с контактных колец, при этом увеличивается. Поэтому, если напряжение между кольцами не превышает указанных величин, предпочтительно выполнить соединение фаз в звезду.

5. Ток ротора (фазный):

$$I_{\Phi 2} = 0{,}9 \times \frac{I_{\Phi 1} \times z_1 \times S_{\text{ЭФФ}1} \times k\beta_1 \times a_2}{z_2 \times S_{\text{ЭФФ}2} \times k\beta_2 \times a_1} \quad a \quad (3\text{–}42)$$

где: $I_{\Phi 1}$ – фазовый ток статора, *а*.

6. Плотность тока:

$$j_2 = \frac{I_{\Phi 2}}{Q_{\text{ЭФФ}2} \times a_2} = \frac{I_{\Phi 2}}{q\text{э}_2 \times m_2 \times a_2} \quad a/\text{мм}^2 \quad (3-43)$$

где: $Q_{\text{ЭФФ}2}$ – площадь сечения эффективного провода в пазе, *мм*^{2};
$q\text{э}_2$ – площадь сечения элементарного проводника, *мм*^{2};
m_2 – число элементарных проводников в эффективном проводе.

7. Линейная нагрузка:

$$A_2 = \frac{I_{\Phi 2} \times z_2 \times S_{\text{ЭФФ}2}}{\pi \times Da_2 \times a_2} \quad a/\text{см}. \quad (3-44)$$

8. Коэффициент заполнения свободного сечения паза ротора, так же, как и для статора, определяется как отношение суммы площадей прямоугольников, описанных вокруг всех проводов, заложенных в паз к свободному сечению паза.

3–4. Поверочный расчет электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

Электродвигатели с короткозамкнутым ротором могут иметь ряд специфических ненормальностей из–за неправильного соотношения числа пазов статора, ротора и числа полюсов. Ненормальности заключаются в том, что электродвигатель может прилипать, т. е. не приходить во вращение при подключении к сети, или, начав вращаться, застревать на некоторой скорости, обычно составляющей ½ от номинальной, или при вращении сильно гудеть.

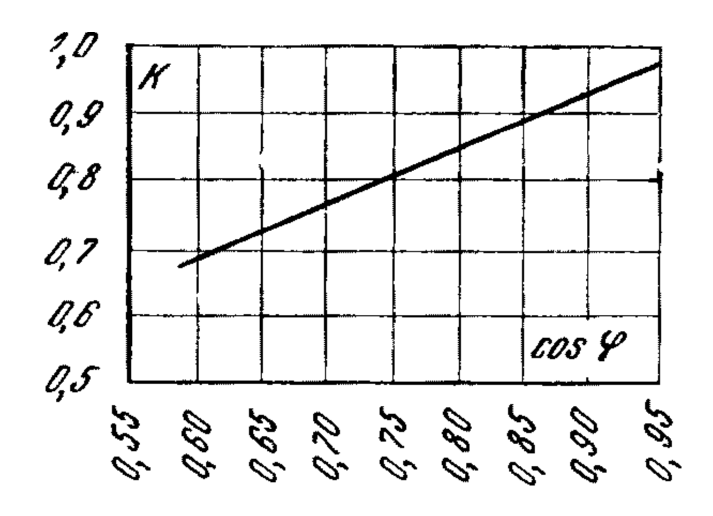
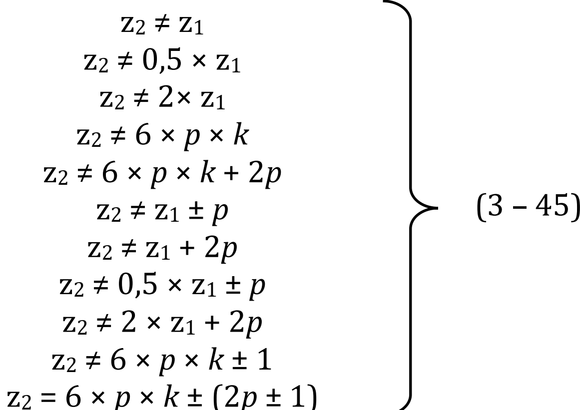


Рис. 3–3. Зависимость коэффициента *K* от cos φ.

Во избежание указанных явлений должны быть выдержаны следующие соотношения между числами пазов и полюсов:



$$\left.\begin{array}{c} z_2 \neq z_1 \\ z_2 \neq 0{,}5 \times z_1 \\ z_2 \neq 2 \times z_1 \\ z_2 \neq 6 \times p \times k \\ z_2 \neq 6 \times p \times k + 2p \\ z_2 \neq z_1 \pm p \\ z_2 \neq z_1 + 2p \\ z_2 \neq 0{,}5 \times z_1 \pm p \\ z_2 \neq 2 \times z_1 + 2p \\ z_2 \neq 6 \times p \times k \pm 1 \\ z_2 = 6 \times p \times k \pm (2p \pm 1) \end{array}\right\} \quad (3-45)$$

где: k – любое целое число.

Следует отметить, что электромашиностроительными заводами при изготовлении электродвигателей указанные условия не всегда полностью соблюдаются, что в некоторых случаях влечет за собой серьезные затруднения при эксплуатации электродвигателей. При поверочном расчете короткозамкнутого ротора, так же, как и для фазного, следует определить индукции в зубцах и теле ротора и сравнить их с допустимыми по табл. 3–3.

Ток в стержне обмотки (беличьей клетке):

$$I_С = \frac{K \times I_{Ф1} \times 6 \times w_{ЭФФ1} \times k\beta_1}{z_2} \quad a \quad (3-46)$$

где: K – коэффициент, зависящий от cos φ электродвигателя и определяемый по кривой на рис. 3–3.

Ток в короткозамыкающем торцевом кольце:

$$I_К = I_С \times \frac{1}{2 \times sin \times \frac{\beta}{2}} \quad a \quad (3-47)$$

где: β – угол сдвига токов в соседних стержнях.

$$\beta = \frac{2 \times \pi \times p}{z_2} \ \text{рад} \ (3-48)$$

Плотность тока в стержнях и замыкающем кольце также сравнивают с допустимыми величинами по табл. 3–3. Кроме вышеуказанных электромагнитных нагрузок подлежит проверке величина механического напряжения от растяжения σ, возникающего в короткозамыкающем кольце при вращении ротора под действием центробежных сил и собственного веса кольца.

Рис. 3–4. Короткозамыкающее кольцо с пазами для стержней.

Для массивных колец, не ослабленных пазами под стержни:

$$\sigma = 2{,}8 \times D\text{к} \times nc \times \gamma \times 10^{-8} \text{ кг/см}^2 \quad (3-49)$$

где: Dк – средний диаметр кольца, *см.*; γ – удельный вес материала кольца, *г/см*^{2}.
Для колец, имеющих пазы под стержни (рис. 3–4):

$$\sigma' = \sigma \times \frac{b\text{к}}{f} \quad \text{кг/см}^2 \quad (3-50)$$

где: bк – радиальная толщина кольца, *см.*; f – высота мостика, *см.*

3–5. Расчёт для определения обмоточных данных.

Для ремонта могут поступать электродвигатели, у которых отсутствуют паспортные щитки, а обмотки либо демонтированы, либо повреждены в такой степени, что не представляется возможным определить и при ремонте сохранить их параметры. Обмотка электродвигателя может быть не заводского исполнения и нет уверенности в ее технической правильности.

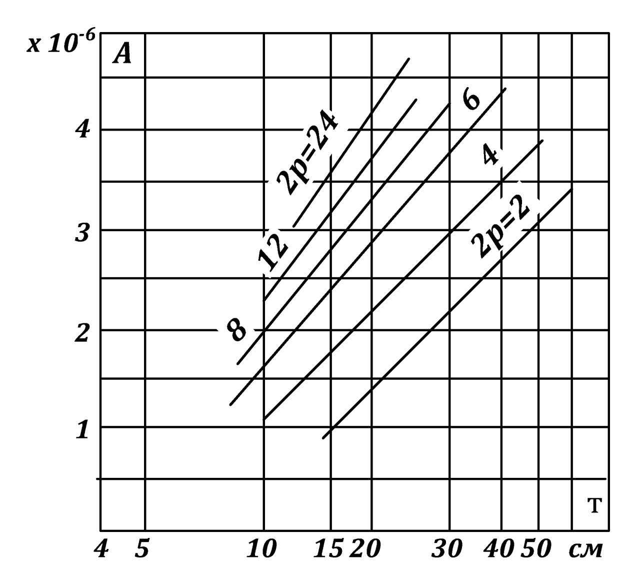


Рис. 3–5. Постоянная мощности A в зависимости от полюсного деления τ.

В этих случаях следует проверить, нет ли в альбомах обмоточных данных такого электродвигателя, геометрические и конструктивные размеры которого совпадают с данными ремонтируемого электродвигателя. При таком совпадении, когда ремонтируемому электродвигателю будет подобран его заводской паспорт, задача расчета сокращается и сводится к поверочному расчету. Если же по альбомам обмоточных данных не будет установлен паспорт электродвигателя, то требуемое напряжение и скорость вращения оговариваются заказчиком в задании на ремонт, а обмоточные данные устанавливаются расчетным путем на основании снятых с натуры размеров и данных о допустимых электромагнитных нагрузках, приведенных в табл. 3–3.

Для рассматриваемых условий ремонта последовательность расчета следующая:

1. В соответствии с заданием и размерами электродвигателя вычисляют:

число полюсов $2p$ – по формуле (3–1);
полюсное деление τ – по формуле (3–4);
зубцовый шаг статора tz_1 – по формуле (3–5);

зубцовый шаг ротора tz_2 – по формуле (3–28);
активную длину пакета стали статора l_1, – по формуле (3–6);
активную длину пакета стали ротора l_2 – по формуле (3–29);
площадь паза статора Q_{Z1} по рис. 3–1;
площадь паза ротора Q_{Z2} по рис. 3–1;
расчетную ширину зубца статора b_1 – по формуле (3–7) или (3–8);
расчетную ширину зубца ротора b_2 – по формуле (3–30) или (3–31);
высоту спинки статора ha_1 – по формуле (3–9);
высоту тела ротора ha_2 – по формуле (3–33).

2. Определяют ориентировочно полезную мощность электродвигателя по формуле:

$$P = A \times Di_1^2 \times lt_1 \times nc \quad \text{квт } (3\text{–}51)$$

где: A – коэффициент использования (постоянная мощности), значение которого в зависимости от полюсного деления τ приведено на рис. 3–5. Определенная по формуле (3–51) мощность электродвигателя является приближенной. Вычисление ее производится только для возможности пользования при расчетах табл. 3–3, где допустимые электромагнитные нагрузки указаны в зависимости от мощности электродвигателя.

3. Руководствуясь табл. 3–3 и сообразуясь с ориентировочной мощностью электродвигателя, задаются величиной индукции в воздушном зазоре и вычисляют значение индукции в зубцах статора по формуле (3–19), в спинке статора – по формуле (3–20), в зубцах ротора–по формуле (3–36) и в теле ротора – по формуле (3–37). Расчет начинают, задаваясь максимальным значением $B\delta$ (в табл. 3–3 для каждой мощности указаны предельные–максимальное и минимальное значения индукции). Целесообразность этого следует из формулы (3–14); увеличение $B\delta$ влечет за собой пропорциональное уменьшение числа эффективных проводов в пазе, что в свою очередь позволяет увеличить сечение каждого эффективного провода и тем самым повысить допустимый ток и мощность электродвигателя.
Однако чрезмерная величина индукции в зазоре может привести к недопустимым индукциям в активной стали электродвигателя, увеличению намагничивающего тока, возрастанию потерь и снижению коэффициентов мощности и полезного действия электродвигателя. При очень больших индукциях в спинке статора наблюдается вытеснение потока в окружающие конструктивные детали электродвигателя и сильный нагрев этих деталей. В таких случаях предварительно выбранная максимальная величина индукции в зазоре должна быть снижена в такой степени, чтобы сопряженные с ней индукции на других участках магнитной цепи электродвигателя уложились в допустимые пределы. Если при составлении вариантов расчетов индукций при различных значениях $B\delta$ не удается добиться требуемых результатов, то это может быть по причине неправильного значения скорости вращения электродвигателя при заказе на ремонт.

Из формулы (3–20), принимая среднее из приведенных в табл. 3–3 значений индукции в воздушном зазоре и спинке статора, можно получить следующую ориентировочную зависимость между числом полюсов, диаметром расточки и высотой статора:

$$2p = 0{,}5 \div 0{,}6 \times \frac{Di_1}{ha_1} \quad (3\text{–}52)$$

Поэтому при неудовлетворительных результатах подсчета индукции следует произвести повторные расчеты при другом числе полюсов, вычисленных по формуле (3–52).

Из рассмотрения магнитной цепи электродвигателя следует, что площадь сечения магнитопровода в спинке статора и теле ротора не зависит от числа полюсов, а площадь сечения в воздушном зазоре и зубцах статора и ротора изменяется обратно пропорционально числу полюсов. Если при допустимом значении индукции в зазоре получаются завышенные индукции в спинке статора, следует увеличить число полюсов и тем самым разгрузить спинку. Если же индукция значительно меньше указанной в табл. 3–3, то следует уменьшить число полюсов.

Несколько завышенная, а тем более заниженная индукция в теле ротора при допустимых значениях на других участках магнитопровода не может служить окончательным признаком, что $B\delta$ выбрана неправильно, так как иногда заводы–изготовители выпускают электродвигатели с несколько искаженной индукцией в теле ротора.

4. Выбирают тип обмотки для статора и ротора. В асинхронных двигателях малой и средней мощности для статоров применяются однослойная обмотка с концентрическими катушками, двухслойная и однослойная цепная обмотки. В крупных электродвигателях применяются главным образом двухслойные обмотки, реже однослойные с концентрическими катушками. В гл. 2 описывались условия выполнимости, преимущества и недостатки различных типов статорных обмоток. Обмотку ротора выбирают к электродвигателям с фазовыми роторами. В большинстве случаев поступающие в ремонт электродвигатели с короткозамкнутым ротором вообще не требуют ремонта ротора, но даже если ротор и нуждается в ремонте, то тип его обмотки совершенно определен.
Наиболее распространены фазовые роторы с трехфазной двухслойной стержневой волновой обмоткой с двумя стержнями в пазе. Эти обмотки обычно выполняются с диаметральным шагом и целым числом пазов на полюс и фазу q или, реже, с нецелым числом q, но с дробной частью, равной ½. Сопряжение фаз чаще всего производится в звезду.
Как указывалось в гл. 2, каждый стержень (полусекция) или может состоять из одного массивного провода прямоугольного либо специального профиля, или подразделяться на несколько параллельных проводов при больших токах ротора.
При стержневых обмотках пазы ротора обычно закрытые или имеют небольшой шлиц. При закрытых пазах обмотка выполняется также протяжной, с однослойными концентрическими катушками из круглого провода. Этот вид роторов является устаревшим, и ремонт электродвигателя с такими роторами производится редко. В роторах, имеющих пазы со шлицами, применяются всыпные обмотки, чаще всего с однослойными и реже с двухслойными катушками из круглого провода. Массовое применение для роторов нашли двухслойные обмотки в электродвигателях единой серии типа АК мощностью до 100 *квт*, имеющих открытые пазы.

После выбора типа обмотки статора вычисляется шаг обмотки:
при однослойной обмотке – диаметральный:

$$y_1 = \frac{z_1}{2p}$$

и при двухслойной – укороченный:

$$y_1 = \beta \times \frac{z_1}{2p}$$

где: β – коэффициент укорочения (обычно от 0,75 до 0,85). По табл. 3–4 или по формуле (3–18) определяется обмоточный коэффициент для статора $k\beta_1$ аналогично для фазного ротора вычисляется значение $k\beta_2$.

5. Задаваясь числом параллельных ветвей в фазе на основании формулы (3–14), определяют число эффективных проводов в пазе статора:

$$S_{ЭФФ} = \frac{2{,}5 \times p \times U_{Ф1} \times a_1}{B\delta \times lt_1 \times z_1 \times Di_1 \times k\beta_1} \times 10^2$$

и число эффективных витков в фазе статора:

$$w_{ЭФФ1} = \frac{w_{об1}}{a_1} = \frac{S_{ЭФФ1} \times z_1}{6 \times a_1}$$

Число эффективных проводов в пазе ротора принимают, исходя из допустимой величины напряжения между кольцами по формулам 3–40 и 3–41. Для наиболее употребительных двухслойных стержневых волновых обмоток, как указывалось, $S_{ЭФФ2}$ = 2.

6. Определяют свободное сечение паза Q'_{Z1} как разность между его площадью в свету и площадью, занимаемой пазовой изоляцией, межслоевой прокладкой и клином. Определяют коэффициент свободного сечения паза:

$$K'' = \frac{Q'z_1}{Qz_1}$$

7. Определяют сумму площадей прямоугольников, описанных вокруг всех изолированных проводов, заложенных в паз:

$$Qz_1'' = K_1' \times Qz_1' = K_1' \times K_1'' \times Qz_1$$

где: K'_1 – коэффициент заполнения свободного сечения паза, равный 0,65–0,7 для медных проводов и 0,7–0,75 для алюминиевых проводов.

8. Определяют площадь прямоугольника, описанного вокруг изолированного элементарного проводника:

$$q'_{ЭИ1} = \frac{Q''_{Z1}}{m_1} \times S_{ЭФФ1}$$

где: m_1 – количество элементарных проводников, на которое подразделен каждый эффективный провод, заложенный в паз. Необходимость разбивки эффективного провода на элементарные проводники и разбивки каждой фазы на параллельные ветви возникает, если размер провода таков, что он не проходит через шлиц.

В электродвигателях малой и средней мощности стремятся выполнить обмотку с a = 1 и m_1 = 1, причем в электродвигателях малой мощности это условие обычно выполняется автоматически. При определении числа параллельных ветвей в каждой фазе обмотки и числа элементарных проводников в эффективном проводе, заложенном в паз, руководствуются следующим.

а) При заданном сечении эффективного провода следует стремиться применить один провод или несколько проводов максимально допустимого сечения. Максимальный диаметр провода (без изоляции) не должен превышать:

для обмоток, выполненных медным проводом, 1,81 *мм*.
для обмоток, выполненных алюминиевым проводом, 2,26 *мм*.

б) Диаметр изолированного провода должен быть на 0,3–0,4 *мм*. меньше размера шлица паза. В противном случае может иметь место повреждение изоляции провода при их укладке. Число параллельных ветвей в фазе не может быть произвольным. Выполнимость обмотки с тем или иным числом параллельных ветвей описывалась в гл. 2. Для практических целей при выборе числа параллельных ветвей для электродвигателей мощностью до 100 *квт* можно пользоваться табл. 3–9.

Таблица 3–9. Число параллельных ветвей в обмотке статора.

Вид обмотки	Число полюсов					
	2	4	6	8	10	12
Двухслойная обмотка	1	1, 2	1, 2, 3	1, 2, 4	1, 2, 5	1, 2, 3, 4, 6
Однослойная обмотка	1	1, 2	1, 3	1, 2, 4	1, 5	1, 2, 3, 6

Для обмотки фазового ротора аналогичным образом определяются: m_2, a_2 и $q_{Э2}$.
Диаметр изолированного элементарного проводника составляет:

$$d_{ИЗ1} = \sqrt{q'_{ЭИ1}}$$

полученное значение округляется до ближайшего меньшего стандартного диаметра провода.

Размер неизолированного провода: $d_1 = d_{ИЗ1} - \Delta$

где: Δ – двусторонняя толщина изоляции провода.

Ввиду большой номенклатуры применяемых обмоточных проводов часто бывает, что провод требуемых размеров отсутствует. В этих случаях прибегают к его замене двумя проводами, эквивалентными по суммарному сечению. При этой замене следует учитывать, что коэффициент заполнения свободного сечения паза увеличивается.

9. Вычисляют фазный ток статора по формуле (3–21):

$$I_{Ф1} = j_1 \times a_1 \times m_1 \times q_{Э1}$$

Величина плотности тока выбирается по табл. 3–3.

10. Вычисляют фазный ток ротора по формуле (3–42):

$$I_{Ф2} = 0{,}9 \times \frac{I_{Ф1} \times z_1 \times S_{ЭФФ1} \times k\beta_1 \times a_2}{z_2 \times S_{ЭФФ2} \times k\beta_2 \times a_1}$$

и определяют плотность тока по формуле (3–43)

$$j_2 = \frac{I_{Ф2}}{q_{Э_2} \times m_2 \times a_2}$$

Если значение j_2 превышает допустимое по табл. 3–3, следует снизить $I_{Ф1}$ до такой степени, чтобы значение j_2 уложилось в допустимые пределы или, если это возможно, для выбранного типа обмотки увеличить $S_{ЭФФ2}$ (без уменьшения сечения провода).
Для короткозамкнутых роторов вычисляются токи в стержне по формуле (3–46) и в короткозамыкающем торцевом кольце – по формуле (3–47). В случае, если обмотка короткозамкнутого ротора демонтирована, размеры и форма стержней восстанавливаются по форме паза, а сечение короткозыкающего кольца определяется из соотношения:

$$Q_{КК} = \frac{I_{КК}}{j_{КК}}$$

где: $I_{КК}$ и $j_{КК}$ – ток и плотность тока в короткозамыкающем кольце. Размеры короткозамыкающего кольца выбираются с учетом, чтобы возникающие в них механические напряжения при вращении, определяемые формулами (3–49) и (3–50), не превосходили допустимых величин.

11. Определяют величину A_1 по формуле (3–24) и A_2 – по формуле (3–44) и вычисляют произведения $j_1 \times A_1$ и $j2 \times A_2$. Если эти произведения превзойдут допустимые пределы, следует снизить $I_{Ф1}$ до такой степени, чтобы значения указанных произведений уложились в допустимые пределы.

12. Определяют кажущуюся мощность, потребляемую электродвигателем, по формуле (3–22) или (3–23):

$$\text{при соединении фаз в звезду}\ \ P' = \frac{U \times I_{Ф_1} \times \sqrt{3}}{1000}$$

или

$$\text{при соединении фаз в треугольник}\ \ P' = \frac{U \times I_{Ф_1} \times 3}{1000}$$

Номинальная мощность электродвигателя (мощность на валу):

$$P = P' \times cos\varphi \times \eta$$

Значения η и cos φ подбираются по одной из табл. 3–5 и 3–8. Одним из важных эксплуатационных показателей является величина тока холостого хода I_{XX} – для трехфазных электродвигателей ток холостого хода мало отличается от тока намагничивания (на 2–4%).
Определение тока холостого хода производится по формуле:

$$I_{XX} = 0{,}35 \times \frac{p \times F}{w_{ЭФФ1} \times k\beta_1}$$

где: F – полная м. д. с. магнитной цепи электродвигателя на пару полюсов, слагающаяся из м. д. с: воздушного зазора – $F\delta$, спинки статора – Fa_1, зубцов статора – Fz_1, тела ротора – Fa_2, зубцов ротора – Fz_2,

$$F = F\delta + Fa_1 + Fz_1 + Fa_2 + Fz_2.$$

С допустимым приближением можно принять, что м. д. с. ротора составляет 90% от м. д. с. статора, т. е.

$$Fa_2 + Fz_2 = 0{,}9 \times (Fa_1 + Fz_1)$$

тогда:

$$F = \ F\delta \times 1{,}9 \times (Fa_1 + Fz_1)$$

Определение $F\delta$ производится по формуле:

$$F\delta = 1{,}6 \times B\delta \times k\delta \times 10^4$$

где: $k\delta$ – коэффициент воздушного зазора:

$$k\delta = \left(\frac{tz_1 + 10\delta}{b_1' + 10\delta}\right) \times \left(\frac{tz_2 + 10\delta}{b_2' + 10\delta}\right) *$$

* Если статор или ротор электродвигателя не имеет шлицев, то соответствующий сомножитель принимается равным единице. Определение Fa_1 производится по формуле:

$$Fa_1 = La_1 \times Ha_1$$

где: La_1 – средняя длина силовой линии в спинке статора, равная:

$$La_1 = \frac{\pi \times (Di_1 + 2 \times hz_1 + ha_1)}{2p}$$

Ha_1 – напряженность магнитного поля в спинке статора, определяемая по кривым или таблицам намагничивания в зависимости от сорта стали и величины индукции в спинке статора. Определение F_{z1} производится по формуле:

$$Fz_1 = 2 \times Hz_1 \times hz_1$$

где: Hz_1 – напряженность магнитного поля в зубцах статора, определяемая по соответствующим таблицам или кривым намагничивания в соответствии со значением расчетной индукции в зубцах.

Пример расчета при демонтированной обмотке и отсутствии паспорта.

Технические требования: электродвигатель предназначается для работы от сети напряжением 500 *в* с синхронной скоростью вращения 1000 *об/мин*. Исполнение электродвигателя – защищенное. Данные замеров:

а) Статор

наружный диаметр пакета стали Da_1 – 46,0 *см*.
внутренний диаметр пакета стали Di_1 – 31,0 *см*.
полная длина пакета стали lt_1 – 22,5 *см*.
число вентиляционных каналов $n\text{к}_1$ – 3
ширина вентиляционного канала $b\text{к}_1$ – 1 *см*.
коэффициент заполнения пакета стали (лаковая межлистовая изоляция, толщина листов 0,5 *мм*.) k_1 – 0,93.
число пазов z_1 – 72.
ширина зубца в широком месте b_1' – 0,85 *см*.
ширина зубца в узком месте b_1'' – 0,58 *см*.
высота паза hz_1 – 3,2 *см*.
площадь паза Qz_1 – 375 *мм*^{2}.

б) Ротор

наружный диаметр пакета стали Da_2 – 30,0 *см*.
внутренний диаметр пакета стали Di_2 – 8,5 *см*.
Полная длина пакета стали lt_2 – 22,5 *см*.
Коэффициент заполнения пакета стали k_2 – k_1, – 0,93.
Число пазов z_2 – 90.
Ширина зубца в широком месте b_2' – 0,54 *см*.
Ширина зубца в узком месте b_2'' – 0,36 *см*.
Высота паза hz_2 – 6,55 *см*.
Ширина паза a_2 – 1,2 *см*.
Ротор фазовый, без вентиляционных каналов

Расчет.

1. Число полюсов:

$$2p = \frac{6000}{nc} = \frac{6000}{1000} = 6$$

2. Полюсное деление:

$$\tau = \pi \times \frac{Di_1}{2p} = 3,14 \times \frac{31,0}{6} = 16,2 \text{ см.}$$

3. Зубцовый шаг статора:

$$tz_1 = \frac{\pi \times Di_1}{z_1} = \frac{3{,}14 \times 31{,}0}{72} = 1{,}35 \text{ см.}$$

4. Зубцовый шаг ротора:

$$tz_2 = \frac{\pi \times Da_2}{z_2} = \frac{3{,}14 \times 30{,}0}{90} = 1{,}05 \text{ см.}$$

5. Активная длина пакета стали статора:

$$l_1 = k_1 \times (lt_1 - n\text{к}_1 \times b\text{к}_1) = 0{,}93 \times (22{,}5 - 3 \times 1) = 18{,}1 \text{ см.}$$

6. Активная длина пакета стали ротора:

$$l_2 = k_2 \times l_{t2} = 0{,}93 \times 22{,}5 = 21{,}0 \text{ см.}$$

7. Расчетная ширина зубца статора:

$$b_1 = \frac{2}{3} \times b_1' + \frac{1}{3} \times b_1'' = \frac{2}{3} \times 0{,}85 + \frac{1}{3} \times 0{,}58 = 0{,}76 \text{ см.}$$

8. Расчетная ширина зубца ротора:

$$b_2 = \frac{2}{3} \times b_2' + \frac{1}{3} \times b_2'' = \frac{2}{3} \times 0{,}54 + \frac{1}{3} \times 0{,}36 = 0{,}48 \text{ см.}$$

9. Высота спинки статора:

$$ha_1 = \frac{Da_1 - Di_1}{2} - hz_1 = \frac{46{,}0 - 31{,}0}{2} - 3{,}2 = 4{,}3 \text{ см.}$$

10. Высота тела ротора:

$$ha_2 = \frac{Da_2 - Di_2}{2} - hz_2 = \frac{30{,}0 - 8{,}2}{2} - 6{,}55 = 4{,}2 \text{ см.}$$

11. Ориентировочная мощность электродвигателя:

$$P = A \times Di_1^2 \times lt_1 \times nc$$

по рис. 3–5 при τ = 16,2 *см.* и $2p = 6$ значение A составляет $2{,}5 \times 10^{-6}$.

$$P = 2{,}5 \times 31{,}0^2 \times 22{,}5 \times 1000 \times 10^{-6} = 54 \text{ квт.}$$

12. Величина индукции в воздушном зазоре $B\delta$ согласно табл. 3–3 принимается 0,8 *тл*.

13. Индукция в зубцах статора:

$$B_{31} = \text{В}\delta \times \frac{tz_1}{b_1} \times \frac{lt_1}{l_1} = 0{,}8 \times \frac{1{,}35}{0{,}76} \times \frac{22{,}5}{18{,}1} = 1{,}77 \text{ тл.}$$

14. Индукция в спинке статора:

$$Ba_1 = 0{,}55 \times B\delta \times \frac{Di_1}{ha_1} \times \frac{lt_1}{l_1} \times \frac{1}{p} = 0{,}55 \times 0{,}8 \times \frac{31{,}0}{4{,}3} \times \frac{22{,}5}{18{,}1} \times \frac{1}{3} = 1{,}31 \text{ тл.}$$

15. Индукция в зубцах ротора:

$$B_{32} = B\delta \times \frac{tz_2}{b_2} \times \frac{lt_2}{l_2} = 0{,}8 \times \frac{1{,}05}{0{,}48} \times \frac{22{,}5}{21{,}0} = 1{,}85 \text{ тл.}$$

16. Индукция в теле ротора:

$$Ba_2 = 0{,}55 \times B\delta \times \frac{Da_2}{ha_2} \times \frac{lt_2}{l_2} \times \frac{1}{p} = 0{,}55 \times 0{,}8 \times \frac{30{,}0}{4{,}2} \times \frac{22{,}5}{21{,}0} \times \frac{1}{3} = 1{,}1 \text{ тл.}$$

Индукция в зубцах статора и ротора, в спинке статора и теле ротора находится в допустимых пределах, указанных в табл. 3–3. Поэтому нет надобности корректировать выбранную величину $B\delta$.

17. Обмотка статора выбирается двухслойной с сокращением шага, равным 0,85.

18. Число пазов на полюс и фазу обмотки статора:

$$q_1 = \frac{z_1}{3 \times 2p} = \frac{72}{3 \times 6} = 4$$

19. Шаг обмотки статора:

$$y_1 = \frac{\beta \times z_1}{2p} = \frac{0{,}85 \times 72}{6} = 10{,}2$$

округляется до 10.

20. Обмоточный коэффициент обмотки статора по табл. 3–4: $k\beta_1 = 0{,}931$

21. Обмотка ротора выбирается двухслойной с двумя стержнями в пазе с диаметральным шагом:

$$S_{ЭФФ2} = 2$$

$$w_{ЭФФ2} = \frac{S_{ЭФФ2} \times z_2}{2p} = \frac{2 \times 90}{6} = 30$$

$$a_2 = 1$$

22. Число пазов на полюс и фазу обмотки ротора:

$$q_2 = \frac{z_2}{3 \times 2p} = \frac{90}{3 \times 6} = 5$$

23. Шаг обмотки ротора:

$$y_2 = \frac{z_2}{2p} = \frac{90}{6} = 15$$

24. Обмоточный коэффициент обмотки ротора по табл. 3–4: $k\beta_2 = 0{,}957$

25. Число эффективных проводов в пазе статора, принимая в первом приближении $a_1 = 2$

$$S_{ЭФФ1} = \frac{2{,}5 \times p \times U_{Ф1} \times a_1}{B\delta \times lt_1 \times z_1 \times Di_1 \times k\beta_1} \times 10^2 = \frac{2{,}5 \times 3 \times \frac{500}{\sqrt{3}} \times 2}{0{,}8 \times 22{,}5 \times 72 \times 31{,}0 \times 0{,}931} \times 10^2 = 11{,}6$$

округляется до 12.

26. Число эффективных проводов в фазе обмотки статора:

$$w_{ЭФФ1} = \frac{S_{ЭФФ1} \times z_1}{6 \times a_1} = \frac{12 \times 72}{6 \times 2} = 72$$

27. Коэффициент свободного сечения паза K_1'' принимается равным 0,75. Коэффициент заполнения свободного сечения паза K_1' принимается равным 0,67 (для K_1'' и K_1' взяты средние значения). Тогда сумма площадей прямоугольников, описанных вокруг всех изолированных проводов, заложенных в паз, составит:

$$Qz_1'' = K_1' \times K_1'' \times Qs_1 = 0{,}75 \times 0{,}67 \times 375 = 187 \text{ мм}^2$$

28. Принимая в первом приближении m_1 = 3, определяем площадь прямоугольника, описанного вокруг изолированного элементарного проводника, и его диаметр:

$$q_{ЭИ1} = \frac{Qz_1''}{m_1 \times S_{ЭФФ1}} = \frac{187}{3 \times 12} = 5{,}2 \text{ мм}^2$$

$$d_{ИЗ_1} = \sqrt{q_{ЭИ_1'}} = \sqrt{5{,}2} = 2{,}3 \text{ мм.}$$

При марке провода ПЭЛБО диаметр элементарного проводника без изоляции составит:

$$d_1 = d_{ИЗ_1} - \Delta = 2{,}30 - 0{,}21 = 2{,}09 \text{ мм.}$$

Как указывалось выше, во избежание повреждения проводниковой изоляции диаметр провода не должен превышать 1,81 *мм*. Поэтому целесообразно изменить предварительно принятое значение a_1 или m_1.

29. Принимая a_1 = 2 и m_1 = 4, окончательно получаем:

$$q_{ЭИ_1} = \frac{187}{4 \times 12} = 3{,}9 \text{ мм}^2$$

$$d_{ИЗ_1} = \sqrt{3{,}9} = 1{,}97 \text{ мм.}$$

$$d_1 = 1{,}97 - 0{,}21 = 1{,}76 \text{ мм.}$$

$$q_{Э1} = 2{,}4 \text{ мм}^2$$

30. Размеры стержня ротора в соответствии с размерами паза выбираются по ширине 2,8 *мм*. и по высоте 18,5 *мм*.:

$$Q_{ЭФФ2} = 2{,}8 \times 18{,}5 = 53 \text{ мм}^2$$

31. Плотность тока в обмотке статора согласно табл. 3–3 принимается j_1 = 4,5 $а/мм^2$.

32. Номинальный фазовый ток статора:

$$I_{Ф1} = j_1 \times a_1 \times m_1 \times q_{Э1} = 4{,}5 \times 2 \times 4 \times 2{,}4 = 86 \; a$$

33. Номинальный фазный ток ротора:

$$I_{Ф2} = 0{,}9 \times I_{Ф1} \times \frac{S_{ЭФФ1} \times k\beta_1 \times a_2}{S_{ЭФФ2} \times k\beta_2 \times a_1} = 0{,}9 \times 86{,}0 \times \frac{12 \times 0{,}931 \times 1}{2 \times 0{,}957 \times 2} = 225 \; a$$

34. Плотность тока в обмотке ротора:

$$j_2 = \frac{I_{Ф2}}{Q_{ЭФФ2}} = \frac{225}{53} = 4{,}25 \quad a/\text{см}^2$$

35. Линейная нагрузка обмотки статора:

$$A_1 = \frac{I_{Ф1} \times z_1 \times S_{ЭФФ1}}{\pi \times Di_1 \times a_1} = \frac{86{,}0 \times 72 \times 12}{3{,}14 \times 31 \times 2} = 380 \; a/\text{см}$$

36. Произведение $j_1 \times A_1$ составляет для обмотки статора: 4,5 × 380 = 1710.

37. Линейная нагрузка обмотки ротора:

$$A_2 = \frac{I_{Ф2} \times z_2 \times S_{ЭФФ2}}{\pi \times Di_2 \times a_2} = \frac{225 \times 90 \times 2}{3{,}14 \times 30 \times 1} = 430\ \ a/\text{см}$$

38. Произведение $j_2 \times A_2$ составляет для обмотки ротора: 4,25 × 430 = 1830. Величины по пп. 34–38 находятся в допустимых пределах.
39. Фазное напряжение обмотки ротора:

$$U_{Ф2} = U_{Ф1} \times \frac{S_{ЭФФ2} \times z_2 \times k\beta_2 \times a_1}{S_{ЭФФ1} \times z_1 \times k\beta_1 \times a_2} = \frac{500}{\sqrt{3}} \times \frac{2 \times 90 \times 0{,}957 \times 2}{12 \times 72 \times 0{,}931 \times 1} = 125\ \text{в}$$

40. Напряжение на кольцах ротора:

при соединении фаз в звезду $U_2 = \sqrt{3} \times U_{Ф2} = \sqrt{3} \times 125 = 216$ в
при соединении фаз в треугольник $U_2 = U_{Ф2} = 125$ в

Принимается соединение фаз в звезду, так как при этом напряжение между кольцами не превосходит допустимой величины.
41. Кажущаяся мощность электродвигателя:

$$P' = \frac{3 \times I_{Ф1} \times U_{Ф1}}{1000} = \frac{3 \times 86{,}0 \times \frac{500}{\sqrt{3}}}{1000} = 75\ \text{ква}$$

42. Номинальная мощность электродвигателя при cos φ = 0,83 и η = 0,885 согласно табл. 3–7:

$$P = P' \times cos\ \varphi \times \eta = 75{,}0 \times 0{,}83 \times 0{,}885 = 55\ \text{квт.}$$

что совпадает с предварительным подсчетом по п. 11.

3–6. Расчет при изменении коэффициента заполнения паза.

При ремонте электродвигателей старых выпусков представляется возможным увеличить коэффициент заполнения паза путем применения обмоточных проводов с более тонкой изоляцией, а также выполнения изоляции паза из современных, более тонких материалов. Естественно, что при увеличении сечения проводов, заложенных в паз, могут быть повышены ток и мощность электродвигателя. При увеличении мощности электродвигателя приходится считаться со следующими обстоятельствами.
1. Нагрев обмотки характеризуется величиной произведения $j_1 \times A_1$. В соответствии с формулами (3–21) и (3–24) это произведение имеет вид:

$$j_1 \times A_1 = C \times Qz_1 \times j_1^2 \times K_1$$

где: C –постоянная величина, определяемая заданной конструкцией электродвигателя. Таким образом, при увеличении сечения провода ток и мощность не могут быть увеличены в том же соотношении, если коэффициент заполнения паза при этом также увеличился.

2. Отношение максимального вращающего момента к номинальному является нормируемой величиной, оговоренной действующим ГОСТ на электрические машины. Так как момент вращения электродвигателя связан с его мощностью соотношением $M_{НОМ} = 975 \times P/n$, то при увеличении мощности электродвигателя пропорционально увеличивается его номинальный момент. Поэтому для сохранения соотношения максимального и номинального моментов необходимо повысить $M_{МАКС}$.

Следует оговориться, что некоторые электродвигатели имеют запас в части кратности $M_{\text{МАКС}}$ / $M_{\text{НОМ}}$. Если же этого запаса нет, то его следует обеспечить путем изменения обмоточных данных электродвигателя.

Увеличение $M_{\text{МАКС}}$ возможно при повышении индукции в воздушном зазоре, причем увеличение $M_{\text{МАКС}}$ пропорционально квадрату индукции в воздушном зазоре.
Как следует из формулы (3–14), повышение индукции в воздушном зазоре можно произвести только за счет уменьшения числа эффективных проводов в пазе. Это увеличение индукции влечет за собой увеличение потерь в стали. С другой стороны, уменьшение числа проводов в пазе позволяет дополнительно увеличить их сечение (помимо увеличения сечения за счет повышения коэффициента заполнения паза) и тем самым снизить потери в обмотке. Работой Н. М. Слонима [Л. 20] установлено, что сохранение кратности максимального и номинального моментов, а также сохранение суммарных потерь при увеличении коэффициента заполнения паза может быть при следующем соотношении новой и старой мощности и номинального тока электродвигателя:

$$\gamma = \frac{P_{\text{Н}}}{P_{\text{С}}} = \frac{I_{\text{Ф1Н}}}{I_{\text{Ф1С}}} = 0{,}7 \times b + 0{,}3$$

где: b – отношение коэффициентов заполнения паза, т. е.:

$$b = \frac{K_{1\text{Н}}}{K_{1\text{С}}} \text{ или } \gamma - 1 = 0{,}7 \times (b - 1)$$

т. е. каждому проценту увеличения коэффициента заполнения паза соответствует 0,7% увеличения мощности электродвигателя. Здесь и далее к обозначениям, относящимся к старому исполнению, добавляется индекс "с" и к новому исполнению – индекс "н". При указанном увеличении мощности следует число эффективных проводов в пазе уменьшить в соотношении:

$$\frac{S_{\text{ЭФФ1Н}}}{S_{\text{ЭФФ1С}}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}7 \times b + 0{,}3}}$$

а сечение эффективного провода увеличить:

$$\frac{Q_{\text{ЭФФ1Н}}}{Q_{\text{ЭФФ1С}}} = b \times \sqrt{0{,}7 \times b + 0{,}3}$$

При этих изменениях плотность тока в обмотке уменьшится:

$$\frac{j_{1\text{Н}}}{j_{1\text{С}}} = \frac{\sqrt{0{,}7 \times b + 0{,}3}}{b}$$

линейная нагрузка и индукция в зазоре увеличатся:

$$\frac{A_{1\text{Н}}}{A_{1\text{С}}} = \frac{B\delta_{\text{Н}}}{B\delta_{\text{С}}} = \sqrt{0{,}7 \times b + 0{,}3}$$

Также уменьшится произведение плотности тока на линейную нагрузку:

$$\frac{j_{1\text{Н}} \times \text{A}_{1\text{Н}}}{j_{1\text{С}} \times A_{1\text{С}}} = \frac{0{,}7 \times b + 0{,}3}{b}$$

Практически увеличение коэффициента заполнения паза может изменяться от 1,1 до 1,5. Для этих значений указанные выше соотношения сведены в табл. 3–10.

Таблица 3–10. Соотношения при увеличении коэффициента заполнения паза.

Соотношение	Расчетная формула	Величина соотношения при b, равном								
		1,1	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,5
$\frac{P_Н}{P_С}$; $\frac{I_{Ф1Н}}{I_{Ф1С}}$	$0{,}7 \times b + 0{,}3$	1,07	1,105	1,14	1,175	1,21	1,245	1,28	1,315	1,35
$\frac{S_{фФ1Н}}{S_{ЭФФ1С}}$	$\frac{1}{\sqrt{0{,}7 \times b + 0{,}3}}$	0,97	0,955	0,94	0,925	0,91	0,90	0,88	0,87	0,86
$\frac{Q_{фФ1Н}}{Q_{ЭФФ1С}}$	$b \times \sqrt{0{,}7 \times b + 0{,}3}$	1,14	1,21	1,28	1,36	1,43	1,50	1,58	1,66	1,74
$\frac{j_{1Н}}{j_{1С}}$	$\frac{\sqrt{0{,}7 \times b + 0{,}3}}{b}$	0,94	0,915	0,890	0,875	0,850	0,825	0,805	0,790	0,775
$\frac{A_{1Н}}{A_{1С}}$; $\frac{B\delta_Н}{B\delta_С}$	$\sqrt{0{,}7 \times b + 0{,}3}$	1,035	1,05	1,07	1,085	1,10	1,115	1,13	1,145	1,16
$\frac{j_{1Н} \times A_{1Н}}{j_{1С} \times A_{1С}}$	$\frac{0{,}7 \times b + 0{,}3}{b}$	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,922	0,915	0,905	0,909

Ввиду сохранения потерь на прежнем уровне при одновременном увеличении номинальной мощности электродвигателя его к. п. д. возрастет. Коэффициент мощности несколько уменьшится.

Если при перерасчете электродвигателя индукция в зазоре превзойдет предельную величину, указанную в табл. 3–3, то ее следует снизить до максимально допустимой и, исходя из этой сниженной индукции, рассчитать все соотношения, приведенные в табл. 3–10. В качестве конкретного примера модернизации электродвигателя при изменении коэффициента заполнения паза можно привести результаты перемотки электродвигателя единой серии типа АО63–4 мощностью 14 *квт*, напряжением 220/380 *в*, при которой мощность электродвигателя была увеличена до 17 *квт*.

Параметры электродвигателя в заводском исполнении следующие:

Число элементарных проводников в пазе – 64
Число параллельных ветвей в фазе a_1 – 2
Число элементарных проводников в эффективном проводе m_1 – 2
Диаметр проводника без изоляции d_1 – 1,36 *мм*.
Марка изоляции провода – ПЭЛБО
Двусторонняя толщина изоляции Δ – 0,21 *мм*.
Диаметр изолированного провода $d_{ИЗ1}$ – 1,51 *мм*.
Толщина пазовой изоляции – 0,6 *мм*.
Площадь паза Qz_1 – 296 *мм*^{2}
Коэффициент заполнения паза – 0,29

При ремонте оставлены без изменения схема обмотки, число элементарных проводников в эффективном проводе и число параллельных ветвей в фазе.

Были изменены:

а) количество элементарных проводников в пазе; вместо 64 проводников было уложено 60. Это уменьшение вполне целесообразно, так как величина индукции в стали в заводском исполнении не была предельной и ее увеличение на 7% вполне допустимо;
б) толщина пазовой изоляции; вместо изоляции толщиной 0,6 *мм*. на сторону установлена изоляция толщиной 0,3 *мм*. за счет применения современных более топких изоляционных материалов с повышенной электрической прочностью;

в) марка и размер провода; взамен провода марки ПЭЛБО, имеющего двустороннюю толщину изоляции 0,21 *мм.*, был применен провод марки ПЭВ–2 с двусторонней толщиной изоляции 0,11 *мм*. Диаметр неизолированного провода был увеличен до 1,45 *мм.*, и соответственно этому диаметр изолированного провода составил 1,56 *мм*.

Учитывая уменьшение количества проводников, закладываемых в паз, и утонение пазовой изоляции, незначительное увеличение диаметра изолированного провода вполне допустимо. В результате модернизации коэффициент заполнения паза повысился до 0,38 и его отношение к коэффициенту заполнения паза в заводском исполнении составило:

$$b = \frac{0,38}{0,29} = 1,31$$

При указанном соотношении этих коэффициентов по данным табл. 3–10 увеличение поминальной мощности составляет 22%. т. е. мощность электродвигателя после модернизации будет равна 17 *квт*.

3–7. Расчет при изменении напряжения.

При переводе электродвигателя на новое напряжение при той же скорости вращения условием сохранения его мощности является неизменность индукций на всех участках магнитной цепи и объема тока в пазе.
Из формулы (3–14) при неизменной индукции в зазоре следует:

$$\frac{U_{\text{Ф1С}} \times a_{\text{1С}}}{S_{\text{ЭФФ1С}} \times k\beta_{\text{1С}}} = \frac{U_{\text{ЭФФ1Н}} \times a_{\text{1Н}}}{S_{\text{ЭФФ1Н}} \times k\beta_{\text{1Н}}}$$

При сохранении типа и шага обмотки:

$$S_{\text{ЭФФ1Н}} = S_{\text{ЭФФ1С}} \times \frac{U_{\text{ф1Н}}}{U_{\text{Ф1С}}}$$

Из формул (3–22) и (3–23) следует, что при сохранении плотности тока:

$$\frac{I_{\text{Ф1Н}}}{I_{\text{Ф1С}}} = \frac{U_{\text{Ф1С}}}{U_{\text{Ф1Н}}} = \frac{Q_{\text{ЭФФ1Н}}}{Q_{\text{ЭФФ1С}}}$$

или

$$Q_{\text{ЭФФ1Н}} = Q_{\text{ЭФФ1С}} \times \frac{U_{\text{Ф1С}}}{U_{\text{Ф1Н}}}$$

Таким образом, при сохранении скорости вращения, плотности тока и мощности число эффективных проводов в пазе *изменяется прямо пропорционально, а их сечение – обратно пропорционально новому и старому напряжению.*

При увеличении числа проводов в пазе увеличивается объем, занимаемый изоляцией проводов. Поэтому по возможности приходится применять более толстые элементарные проводники, входящие в эффективный провод, или обмоточные провода с более тонкой изоляцией.
Иногда приходится прибегать к уменьшению числа параллельных ветвей в фазе и тем самым увеличивать сечение провода в каждой из параллельных ветвей.
Однако упомянутые мероприятия по увеличению коэффициента заполнения паза не всегда можно осуществить, или эффект их может оказаться недостаточным. Кроме того, переход на более высокое напряжение может быть связан с утолщением пазовой изоляции. Поэтому не всегда удается сохранить общее сечение меди в пазе, что приводит к необходимости снижения мощности электродвигателя.

При переводе крупных электродвигателей с номинального напряжения 3 *кв* на 6 *кв* практически потери мощности достигают 15–20%. Перевод электродвигателей на пониженное напряжение во многих случаях позволяет увеличить их мощность благодаря облегчению пазовой изоляции и уменьшению числа эффективных проводов в пазе.

Пример пересчета электродвигателя напряжением 127/220 *в* на напряжение 380/220 *в*.

Параметры обмотки электродвигателя:

Тип обмотки – двухслойная.
Число эффективных проводов в пазе $S_{ЭФФ1}$ – 20.
Число параллельных ветвей a_1 – 2.
Число элементарных проводников в эффективном проводе m_1 – 1
Общее число проводников в пазе – 40.
Диаметр элементарного проводника (неизолированного) d_1 – 1,3 *мм*.
Сечение элементарного проводника $q_{Э1}$ – 1,327 *мм*^{2}.
Марка провода – ПЭЛБО. Двусторонняя толщина изоляции Δ_1 – 0,21 *мм*.
Диаметр изолированного элементарного проводника $d_{ИЗ1}$ – 1,51 *мм*.

Расчет.

1. При сохранении схемы обмотки и числа элементарных проводников в эффективном проводе число эффективных проводов в пазе составит:

$$S_{ЭФФ1Н} = S_{ЭФФ1С} \times \frac{U_{Ф1Н}}{U_{Ф1С}} = 20 \times \frac{380}{220} = 34{,}6$$

округляется до ближайшего четного числа 34.
2. Сечение элементарного проводника (без изоляции).

$$q_{Э1Н} = q_{Э1С} \times \frac{U_{Ф1c}}{U_{Ф1Н}} = 1{,}327 \times \frac{220}{380} = 0{,}77 \quad \text{мм}^2$$

3. Диаметр элементарного проводника без изоляции:

$$d_{Э1Н} = 1{,}14 \times \sqrt{0{,}77} = 1{,}01 \text{ мм.}$$

округляется до ближайшего стандартного диаметра 1,0 *мм*.

4. Диаметр изолированного проводника при сохранении марки провода:

$$d_{ИЗ1Н} = d_{Э1Н} + \Delta_{1Н} = 1{,}0 + 0{,}21 = 1{,}21 \quad \text{мм.}$$

Указанное уменьшение диаметра провода вызывает снижение коэффициента заполнения провода:

$$K_{1c}''' = \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{d_{1c}}{d_{ИЗ1С}}\right)^2 = \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{1{,}3}{1{,}51}\right)^2 = 0{,}58$$

$$K_{1Н}''' = \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{d_{1Н}}{d_{ИЗ1Н}}\right)^2 = \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{1{,}0}{1{,}21}\right)^2 = 0{,}54$$

Это уменьшение коэффициента заполнения провода при одновременном увеличении количества проводов, укладываемых в паз, может привести к повреждению проводниковой изоляции при укладке обмотки.

Поэтому необходимо либо применить провод другой марки с более тонкой изоляцией, либо применить для изоляции паза и прокладок более тонкие материалы с повышенной электрической прочностью. Если эти мероприятия невозможно осуществить, то рационально изменить обмоточные данные – выполнить обмотку с одной ветвью в фазе вместо двух, без разбивки эффективного провода на элементарные проводники.

5. Сечение провода при этом составит:

$$q_{1\text{Н}} = 1{,}54 \text{ мм}^2$$

6. Диаметр провода без изоляции:

$$d_{\text{Э1Н}} = 1{,}14 \times \sqrt{1{,}54} = 1{,}41 \text{ мм.}$$

округляется до ближайшего стандартного диаметра 1,4 *мм*.

7. Диаметр изолированного провода:

$$d_{\text{И31Н}} = 1{,}4 + 0{,}21 = 1{,}61 \quad \text{мм}$$

Коэффициент заполнения провода:

$$K_{1\text{Н}}''' = \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{d_{1\text{Н}}}{d_{\text{И31Н}}}\right)^2 = \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{1{,}4}{1{,}61}\right)^2 = 0{,}595$$

Таким образом, при переводе обмотки на одну ветвь в фазе коэффициент заполнения паза практически сохраняется, и естественно нет оснований к снижению полезной мощности электродвигателя.

3–8. Расчет при изменении скорости вращения.

При переводе на другую скорость вращения электродвигателей с короткозамкнутым ротором следует сверить по формулам (3–45) возможность такого перевода с точки зрения допустимого соотношения нового, измененного числа полюсов и числа пазов статора и ротора. При уменьшении числа полюсов и при сохранении индукции в воздушном зазоре увеличивается индукция в спинке статора и в теле ротора. При увеличении числа полюсов имеет место обратная зависимость. Индукции же в зубцах статора и ротора остаются неизменными. Пересчет электродвигателя в связи с изменением числа полюсов следует начинать с определения индукции на всех участках магнитной цепи. В некоторых случаях может оказаться, что спинка статора и тело ротора недостаточно загружены магнитным потоком и индукция в них может быть повышена. Это может иметь место у электродвигателей старых выпусков, где активные материалы не всегда были предельно загружены. В тех случаях, когда можно при измененном числе полюсов сохранить индукцию в зазоре и зубцах или, когда возросшая индукция в спинке и зубцах не окажется чрезмерной (превышение не более чем на 10–15% значений, приведенных в табл. 3–3), следует при пересчете руководствоваться следующим.

Из формулы (3–14) вытекает, что при сохранении индукции в зазоре и номинального фазного напряжения:

$$\frac{p_{\text{С}} \times a_{1\text{С}}}{S_{\text{ЭФФ1С}} \times k\beta_{1\text{С}}} = \frac{p_{\text{Н}} \times a_{1\text{Н}}}{S_{\text{ЭФФ1Н}} \times k\beta_{1\text{Н}}}$$

т. е. новое число эффективных проводов в пазе составит:

$$S_{\text{ЭФФ1Н}} = S_{\text{ЭФФ1С}} \times \frac{k\beta_{1\text{С}} \times a_{1\text{Н}}}{k\beta_{1\text{Н}} \times a_{1\text{С}}} \times \frac{p_{\text{Н}}}{p_{\text{С}}} = S_{\text{ЭФФ1С}} \times \frac{k\beta_{1\text{С}}}{k\beta_{1\text{Н}}} \times \frac{n_{\text{СС}}}{n_{\text{СН}}} \times \frac{\text{а}_{1\text{Н}}}{a_{1\text{С}}}$$

При сохранении типа, шага обмотки и объема тока в пазе сечение эффективного провода составит:

$$Q_{\text{ЭФФ1Н}} = Q_{\text{ЭФФ1С}} \times \frac{p_{\text{С}}}{p_{\text{Н}}} = Q_{\text{ЭФФ1С}} \times \frac{n_{\text{СН}}}{n_{\text{СС}}}$$

Номинальная мощность электродвигателя:

$$P_{\text{Н}} = P_{\text{С}} \times \frac{p_{\text{С}}}{p_{\text{Н}}} = P_{\text{С}} \times \frac{n_{\text{СН}}}{n_{\text{СС}}}$$

Когда при увеличении скорости вращения приходится уменьшать индукцию в зазоре, чтобы ввести в норму индукции в спинке статора и теле ротора, пропорционально увеличивается число эффективных проводов в пазе и уменьшаются сечение эффективного провода и номинальная мощность электродвигателя. Увеличение числа эффективных проводов в пазе влечет за собой ухудшение коэффициента заполнения паза. Поэтому при перемотке электродвигателя следует применять провода с более тонкой изоляцией и максимально допустимого диаметра (из условия возможности укладки его через шлиц паза). Для увеличения диаметра провода следует пересмотреть и по возможности уменьшить число элементарных проводников в эффективном проводе и число параллельных ветвей в фазе.

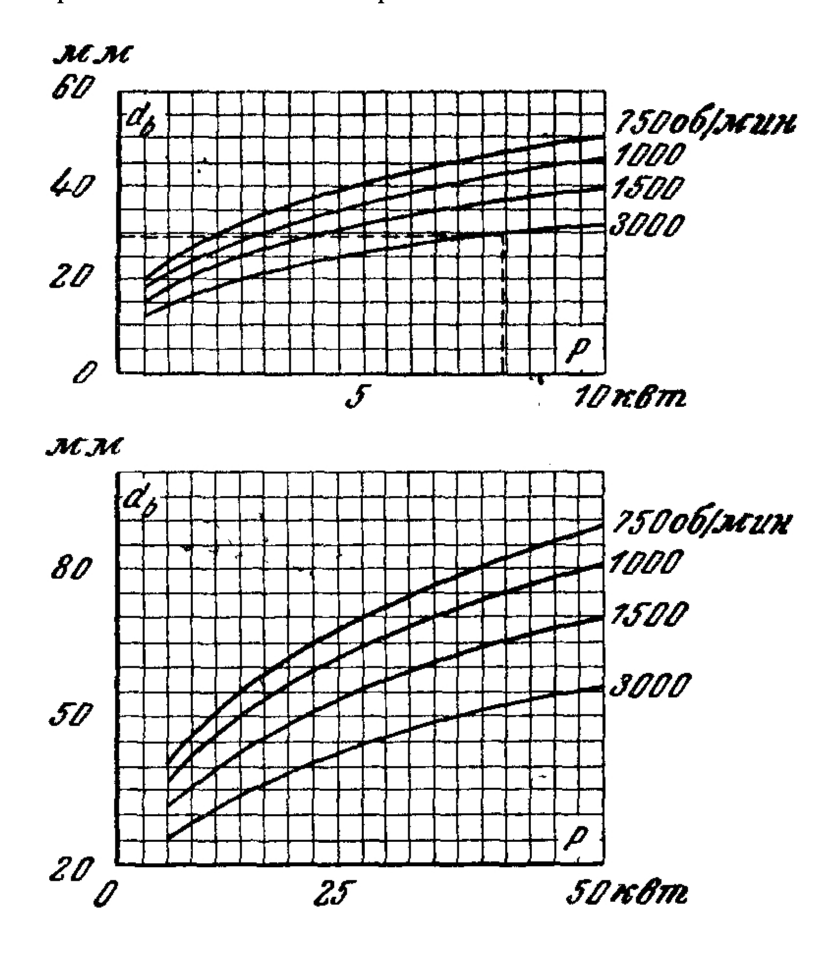


Рис. 3–6. Допустимая нагрузка на вал.

Указанное выше изменение мощности электродвигателя при изменении скорости вращения может рассматриваться как приближенное, так как при увеличении скорости вращения, с одной стороны, увеличиваются потери на трение, а с другой стороны, повышается производительность вентилятора. Увеличение мощности электродвигателя при повышении скорости вращения может ограничиваться механической прочностью его частей и их нагревом.

Окружная скорость ротора определяется по формуле:

$$\upsilon_p = \frac{\pi \times Da_2 \times n}{60 \times 1000} \text{ м/сек.}$$

Эта скорость не должна превышать для фазового ротора 30–40 *м/сек.*, а для короткозамкнутого ротора – 40–60 *м/сек.* Бандаж фазового ротора при увеличении скорости вращения обычно нуждается в усилении. Следует также по рис. 3–6 проверить прочность свободного конца вала (т. е. конца "вала, служащего для насадки шкива, муфты или шестерни). Нагрев подшипников также увеличивается при повышении скорости вращения и увеличении мощности электродвигателя. Потери от нагрева подшипников составляют:

для подшипников скольжения $$\Delta \times P_{\text{П}} = 5{,}5 \times l_Z \times \upsilon_Z^2 \times \sqrt{\frac{P}{n}}$$

для подшипников качения $$\Delta \times P_{\text{П}} = 0{,}015 \times \frac{D_Z}{D_O} \times \sqrt{\upsilon_Z}$$

где: l_Z – длина цапфы, *см.* υ_Z – окружная скорость цапфы, *м/сек.*, D_Z – нагрузка на кольцах шарикового подшипника, *кг.*; D_O – диаметр круга, взятого по центру шариков, *см.*

При перемотках, связанных с уменьшением числа полюсов, увеличивается шаг обмотки и вылет лобовых частей. Следует проверить допустимость этого с точки зрения обеспечения требуемого изоляционного расстояния между торцевыми крышками и обмоткой.

Пример расчета электродвигателя со скоростью вращения 1500 *об. мин.*
на скорость вращения 3000 *об. мин.*

Технические данные электродвигателя:

Мощность P – 4,5 *квт*, напряжение – 220/380 *в*, ток – 16/9,3 *а*, скорость вращения (синхронная) $n_{\text{С}}$ – 1500 *об. мин.* Вид исполнения – защищенный.

Данные замеров:

а) Статор

Внутренний диаметр пакета стали Di_1 – 152 *мм.*
Полная длина пакета стали lt_1 – 120 *мм.*
Число вентиляционных каналов – 2
Ширина вентиляционных каналов $b_{\text{К}1}$ – 10
Коэффициент заполнения пакета стали k_1 – 0,93 (лаковая межлистовая изоляция, толщина листов 0,5 *мм.*)
Число пазов z_1 – 36
Высота спинки ha_1 – 25 *мм.*
Тип обмотки – двухслойная.
Число эффективных проводов в пазе $S_{\text{ЭФФ}1}$ – 32
Число элементарных проводников в эффективном проводе m_1 – 2
Число параллельных ветвей в фазе a_1 – 1
Диаметр элементарного проводника d_1 – 1,16 *мм.*
Сечение элементарного проводника $q_{\text{Э}1}$ – 1,057 *мм*^{2}
Сечение эффективного провода в пазе $Q_{\text{ЭФФ}1}$ – 2,11 *мм*^{2}.

б) Ротор

Наружный диаметр пакета стали Da_2 – 151,2 *мм*.
Полная длина пакета стали lt_2 – 120 *мм*.
Диаметр вала $d_В$ – 45 *мм*.
Число зубцов z_2 – 28
Высота тела ротора ha_2 – 30 *мм*.
Ротор – короткозамкнутый.

Расчет.

1. Проверка соотношения числа полюсов и числа пазов:

$z_2 \neq z_1$	$28 \neq 36$
$z_2 \neq 0,5 \times z_1$	$28 \neq 18$
$z_2 \neq 2 \times z_1$	$28 \neq 72$
$z_2 \neq 6 \times p \times k$	$28 \neq 6, 12, 18, 24$
$z_2 \neq 6 \times p \times k + 2p$	$28 \neq 8, 14, 20, 26$
$z_2 \neq z_1 \pm p$	$28 \neq 35, 37$
$z_2 \neq z_1 \pm 2p$	$28 \neq 38$
$z_2 \neq 0,5 \times z_1 \pm p$	$28 \neq 17, 19$
$z_2 \neq 2 \times z_1 + 2p$	$28 \neq 74$
$z_2 \neq 6 \times p \times k \pm 1$	$28 \neq 5, 7……23, 25$
$z_2 \neq 6 \times p \times k \pm (2p \pm 1)$	$28 \neq 3, 5……25, 27$

Изменение числа полюсов не вызовет прилипания и застревания ротора, а также повышенного шума при работе электродвигателя.

2. Окружная скорость ротора:

$$v_p = \frac{\pi \times Da_2 \times nc_{\text{Н}}}{60 \times 1000} = \frac{3,14 \times 151,2 \times 3000}{60 \times 1000} = 23,8 \text{ м/сек.}$$

что значительно меньше предельной.

3. Прочность свободного конца вала: согласно рис. 3–6 конец вала диаметром 45 *мм*. удовлетворяет условиям прочности.

4. Число полюсов:

$$2p_{\text{Н}} = \frac{6000}{nc_{\text{Н}}} = \frac{6000}{3000} = 2$$

5. Полюсное деление:

$$\tau_{\text{Н}} = \frac{\pi \times Di_1}{2p_{\text{Н}}} = \frac{3,14 \times 15,2}{2} = 23,9 \text{ см.}$$

6. Активная длина пакета стали статора:

$$l_1 = k_1 \times (lt_1 - n\text{к}_1 \times b\text{к}_1) = 0,93 \times (12 - 2 \times 1) = 9,3 \text{ см.}$$

7. Активная длина пакета стали ротора:

$$l_2 = k_1 \times li_2 = 0,93 \times 12,0 = 11,2 \text{ см.}$$

8. Число пазов на полюс и фазу обмотки статора:

$$q_{1\text{Н}} = \frac{z_1}{3 \times 2p_{\text{Н}}} = \frac{36}{3 \times 2} = 6$$

Обмотка статора сохраняется двухслойной, сокращение шага принимается равным 0,7.

10. Шаг обмотки статора:

$$y_{1\text{Н}} = \frac{\beta \times z_1}{2p_\text{Н}} = \frac{0{,}7 \times 36}{2} = 12{,}6$$

округляется до 13.
11. Обмоточный коэффициент обмотки статора по табл. 3–4: $k\beta_{2\text{Н}} = 0{,}853$.
12. Число эффективных проводов в пазе при сохранении типа обмотки (предварительно):

$$S_{\text{ЭФФ1Н}} = S_{\text{ЭФФ1С}} \times \frac{p_\text{Н}}{p_\text{С}} = 32 \times \frac{1}{2} = 16$$

13. Индукция в воздушном зазоре:

$$B\delta = \frac{2{,}5 \times U_\text{Ф} \times p_\text{Н} \times a_1 \times 10^2}{z_1 \times Di_1 \times lt_1 \times k\beta_{1\text{Н}} \times S_{\text{ЭФФ1Н}}} = \frac{2.5 \times 220 \times 1 \times 1 \times 10^2}{36 \times 15{,}2 \times 12{,}0 \times 0{,}853 \times 16} = 0{,}61 \text{ тл.}$$

14. Индукция в спинке статора:

$$Ba_{1\text{Н}} = 0{,}55 \times B\delta_\text{Н} \times \frac{Di_1}{ha_1} \times \frac{lt_1}{l_1} \times \frac{1}{p_\text{Н}} = 0{,}55 \times 0{,}61 \times \frac{15{,}2}{2{,}5} \times \frac{12}{9{,}3} \times \frac{1}{1} = 2{,}6 \text{ тл.}$$

15. Индукция в теле ротора:

$$Ba_{2\text{Н}} = 0{,}55 \times B\delta_\text{Н} \times \frac{Da_2}{ha_2} \times \frac{lt_2}{l_2} \times \frac{1}{p_\text{Н}} = 0{,}55 \times 0{,}61 \times \frac{15{,}12}{3{,}0} \times \frac{12}{11{,}2} \times \frac{1}{1} = 1{,}8 \text{ тл.}$$

16. Индукция в спинке статора превосходит максимально допустимую и должна быть снижена. Индукция в теле ротора находится в допустимых пределах. Индукция в зубцах статора и ротора не проверяется (изменение числа полюсов не влияет на их величину).
17. Индукция в спинке статора принимается 1,8 тл. в соответствии с этим пересчитывается:

$$S_{\text{ЭФФ1Н}} = 16 \times \frac{2{,}6}{1{,}6} = 26$$

18. Сечение эффективного провода:

$$Q_{\text{ЭФФ1Н}} = Q_{\text{ЭФФ1С}} \times \frac{S_{\text{ЭФФ1С}}}{S_{\text{ЭФФ1Н}}} = 2{,}11 \times \frac{32}{26} = 2{,}59 \text{ мм}^2$$

19. Число элементарных проводников сохраняется: $m_{1\text{Н}} = m_{1\text{С}} = 2$.
20. Сечение элементарного проводника:

$$q_{\text{Э1Н}} = \frac{Q_{\text{ЭФФ1Н}}}{m_{1\text{Н}}} = \frac{2{,}59}{2} = 1.3 \text{ мм}^2$$

21. Диаметр элементарного проводника:

$$d_{1\text{Н}} = 1{,}14 \times \sqrt{q_{\text{Э1Н}}} = 1{,}14 \times \sqrt{1{,}3} = 1{,}29 \text{ мм.}$$

округляется до ближайшего диаметра 1,3 *мм*., чему соответствует сечение 1,327 $мм^2$.
22. Фазный ток ротора при сохранении плотности тока в заводском исполнении, равный 4,4 $а/мм^2$:

$$I_{\text{ф1Н}} = j_1 \times Q_{\text{ЭФФ1Н}} = 4{,}4 \times 1{,}327 \times 2 = 11{,}7 \quad a$$

23. Кажущаяся мощность электродвигателя:

$$P'_\text{Н} = \frac{3 \times U_\text{Ф} \times I_{\text{Ф1Н}}}{1000} = \frac{3 \times 11{,}7 \times 220}{1000} = 7{,}7 \quad \text{ква.}$$

24. Номинальная мощность электродвигателя при cos φ = 0,89 и η = 0,87 (согласно табл. 3–5):

$$P_{\text{Н}} = P'_{\text{Н}} \times \cos\varphi \times \eta = 7{,}7 \times 0{,}89 \times 0{,}87 \approx 6{,}0 \text{ квт.}$$

3-9. Расчет при замене медных проводов алюминиевыми.

При ремонте обмоток, связанном с заменой медных проводов алюминиевыми, основным фактором, влияющим на ход расчета, является различие в их удельном сопротивлении, составляющем при 20°С:

для меди $\rho м$ = 0,017 $ом \times мм^2/м$.
для алюминия ρa = 0,028 $ом \times мм^2/м$.

Отношение удельных сопротивлений алюминия и меди:

$$\frac{\rho \text{а}}{\rho \text{м}} = \frac{0{,}028}{0{,}017} = 1{,}65$$

Если выполнить вместо медной обмотки алюминиевую проводом того же размера, оставив без изменения индукцию в воздушном зазоре и число эффективных проводов в пазе, то при номинальном токе возрастут потери в обмотке. Потери в стали останутся без изменения. Для того чтобы сохранить потери в обмотке на прежнем уровне и тем сохранить суммарные потери электродвигателя, необходимо снизить фазный ток. Это снижение определится следующим образом.
Потери в фазе медной обмотки:

$$\triangle P_{\text{м}} = \frac{I^2_{1\text{ФМ}} \times \rho \text{м} \times l}{Q_{\text{ЭФФ1М}}}$$

Потери в фазе алюминиевой обмотки:

$$\triangle P_{\text{а}} = \frac{I^2_{1\text{ФМ}} \times \rho a \times l}{Q_{\text{ЭФФ1М}}}$$

где: l — длина всех эффективных проводов в фазе.
Здесь и далее к обозначениям, относящимся к исполнению обмотки медным проводом, добавлен индекс "м", к исполнению обмотки алюминиевым проводом – индекс "а".

$$Q_{\text{ЭФФ1а}} = Q_{\text{ЭФФ1м}} \text{ и } \Delta P = \Delta P_{\text{м}_\text{м}} \qquad I_{\text{Фа}} = \frac{I_{\text{Фм}}}{\sqrt{1{,}65}} = 0{,}78 \times I_{\text{Фа}}$$

т. е. фазный ток должен быть снижен на 22%. Практически на столько же снижается и номинальная мощность электродвигателя. Если же требуется сохранить номинальные ток и мощность электродвигателя, то для сохранения потерь в обмотке статора следует увеличить сечение эффективного провода. Это увеличение определяется следующим образом. Так как:

$$\frac{I^2_{1\text{Ф}} \times \rho \text{м} \times l}{Q_{\text{ЭФФ1М}}} = \frac{I^2_{1\text{Ф}} \times \rho a \times l}{Q_{\text{ЭФФ1}a}}$$

то

$$\frac{\rho \text{м}}{Q_{\text{ЭФФ1м}}} = \frac{\rho a}{Q_{\text{ЭФФ1}a}} = \frac{1{,}65 \times \rho \text{м}}{Q_{\text{ЭФФ1}a}} \quad \text{или} \quad Q_{\text{ЭФФ1}a} = 1{,}65 \times Q_{\text{ЭФФ1м}}$$

При изготовлении обмотки из круглых проводов диаметр неизолированного (алюминиевого) провода должен быть увеличен по сравнению с медным:

$$da = \sqrt{1{,}65} \times d\text{м} = 1{,}28 \times d\text{м} \quad \text{т. е. на 28\%.}$$

При указанном увеличении диаметра прополов для возможности их укладки прибегают к следующим мерам.

1. Применяют обмоточные провода класса пагревостойкости Е марки ПЭВА-2 на поливипилацеталевом лаке или марки ПЭЛРА-2 на полиамиднорезольном лаке, имеющие более тонкую изоляцию, чем медные провода класса пагревостойкости А, марок ПБД и ПЭЛБО, которыми выполнялась обмотка в заводском исполнении. Толщина изоляции проводов марок ПЭВА-2 и ПЭЛРА-2 значительно меньше, чем у проводов марок ПБД и ПЭЛБО, и составляет:

для диаметров 0,57 – 0,64	0,05 *мм.*
0,64 – 0,72	0,06 *мм.*
0,74 - 0,96	0,065 *мм.*
1,00 - 2,02	0,08 *мм.*
2,10 - 2,24	0,095 *мм.*

2. Изоляцию паза выполняют тонкими электроизоляционными материалами класса нагревостойкости Е.

3-10. Расчет при увеличении воздушного зазора.

При увеличении зазора между статором и ротором существенно повышается сопротивление всей магнитной цепи электродвигателя, что вызывает увеличение тока холостого хода, снижение cos φ и полезной мощности электродвигателя. При ремонте таких электродвигателей рационально изменить число эффективных проводов в пазе (число эффективных витков в фазе) с тем, чтобы ток холостого хода остался неизменным. Ниже приводится соответствующий расчет для этого изменения.
1. Относительное увеличение магнитного сопротивления зазора:

$$\Delta R_{\delta} = \frac{\delta_{\text{Н}} \times k \times \delta_{\text{Н}} - \delta_{\text{С}} \times k \times \delta_{\text{С}}}{\delta_{\text{С}} \times k \times \delta_{\text{С}}}$$

где: $\delta_{\text{С}}$ – величина воздушного зазора в заводском исполнении; $\delta_{\text{Н}}$ – величина воздушного зазора при ремонте;
$k\delta_{\text{С}}$ – коэффициент воздушного зазора в заводском исполнении, равный:

$$k\delta_{\text{С}} = \left(\frac{tz_1 + 10 \times \delta_C}{b_1' + 10 \times \delta_{\text{С}}}\right) \times \left(\frac{tz_2 + 10 \times \delta_C}{b_2' + 10 \times \delta_{\text{С}}}\right)$$

$k\delta_{\text{Н}}$ – коэффициент воздушного зазора при ремонте, равный:

$$k\delta_{\text{Н}} = \left(\frac{tz_1 + 10 \times \delta_{\text{Н}}}{b_1' + 10 \times \delta_{\text{Н}}}\right) \times \left(\frac{tz_2 + 10 \times \delta_{\text{Н}}}{b_2' + 10 \times \delta_{\text{Н}}}\right)$$

tz_1 - зубцовый шаг статора; tz_2 - зубцовый шаг ротора; b'_1 - ширина зубца статора в самом широком месте; b'_2 - ширина зубца ротора в самом широком месте.
2. При существующих соотношениях сопротивлений различных участков магнитной цепи в асинхронных двигателях относительное увеличение магнитного сопротивления всей цепи составляет:

$$\Delta R\mu = 0{,}7 \div 0{,}8 \times \Delta R\delta$$

3. Новое число эффективных витков $w_{\text{ЭФФ1Н}}$ определяется из соотношений м. д. с. в заводском исполнении и при ремонте:

$$F_C = I_{\text{ХХС}} \times w_{\text{ЭФФ1С}} = \frac{I_{\text{ХХС}} \times S_{\text{ЭФФ1С}} \times z_1}{6} = \Phi_{\text{С}} \times R\mu_{\text{С}}$$

$$F_{\text{Н}} = I_{\text{ХХН}} \times w_{\text{ЭФФ1Н}} = \frac{I_{\text{ХХН}} \times S_{\text{ЭФФ1Н}} \times z_1}{6} = \Phi_{\text{Н}} \times R\mu_{\text{Н}}$$

где: $\Phi_{\text{С}}$ - магнитный поток в заводском исполнении; $\Phi_{\text{Н}}$ - магнитный поток при ремонте; $R\mu_{\text{С}}$ - магнитное сопротивление потоку в заводском исполнении; $R\mu_{\text{Н}}$- магнитное сопротивление потоку при ремонте.

4. Из условия сохранения тока холостого хода следует:

$$\frac{S_{\text{ЭФФ1Н}}}{S_{\text{ЭФФС}}} = \frac{\Phi_{\text{Н}} \times R\mu_{\text{Н}}}{\Phi_{\text{С}} \times R\mu_{\text{С}}} = \frac{B\delta_{\text{Н}} \times R\mu_{\text{Н}}}{B\delta_{\text{С}} \times R\mu_{\text{С}}}$$

Исходя из того, что до и после ремонта номинальное напряжение должно сохраняться, в соответствии с формулой (3-14), можно представить:

$$\frac{B\delta_{\text{Н}}}{B\delta_{\text{С}}} = \frac{S_{\text{ЭФФ1С}}}{S_{\text{ЭФФ1Н}}} \quad \text{откуда:} \quad \frac{S_{\text{ЭФФ1Н}}}{S_{\text{ЭФФ1С}}} = \frac{S_{\text{ЭФФ1С}}}{S_{\text{ЭФФ1Н}}} \times \frac{R\mu_{\text{Н}}}{R\mu_{\text{С}}}$$

т. е. новое число эффективных проводников в пазе составит:

$$S_{\text{ЭФФ1Н}} = S_{\text{ЭФФ1С}} \times \sqrt{\frac{R\mu_{\text{Н}}}{R\mu_{\text{С}}}}$$

5. В относительных единицах:

$$\frac{R\mu_{\text{Н}}}{R\mu_{\text{С}}} = 1 - \Delta R\mu$$

поэтому число эффективных проводников в пазе, а также число эффективных витков в фазе повышаются в соотношении:

$$S_{\text{ЭФФ1Н}} = S_{\text{ЭФФ1С}} \times \sqrt{1 + \Delta R\mu}; \quad w_{\text{ЭФФ1Н}} = w_{\text{ЭФФ1С}} \times \sqrt{1 + \Delta R\mu}$$

6. При сохранении коэффициента заполнения паза и плотности тока сечение эффективного провода и ток фазы снижаются в соотношении:

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \Delta R\mu}}, \quad \text{то есть:} \quad Q_{\text{ЭФФ1Н}} = \frac{Q_{\text{ЭФФ1С}}}{\sqrt{1 + \Delta R\mu}}; I_{\text{Ф1Н}} = \frac{I_{\text{Ф1С}}}{\sqrt{1 + \Delta R\mu}}$$

Полезная мощность электродвигателя снизится несколько больше, чем номинальный ток, так как cos φ хотя и несколько поднимается после перемотки с увеличением числа эффективных витков, но все же будет ниже, чем у электродвигателя в заводском исполнении. Можно считать, что новая мощность электродвигателя составит:

$$P_{\text{Н}} = 0{,}9 \times \frac{P_{\text{С}}}{\sqrt{1 + \Delta R\mu}}$$

Если при ремонте электродвигателя с увеличенным воздушным зазором поставить задачу сохранения не намагничивающего тока, а cos φ, то, пользуясь аналогичной методикой расчета, получаем:

$$S_{\text{ЭФФ1Н}} = S_{\text{ЭФФ1С}} \times (1 + \Delta R\mu)$$

$$Q_{\text{ЭФФ1Н}} = \frac{Q_{\text{ЭФФ1С}}}{1 + \Delta R\mu} \quad I_{\text{Ф1Н}} = \frac{I_{\text{Ф1С}}}{1 + \Delta R\mu} \quad R_{\text{Н}} = \frac{P_{\text{С}}}{1 + \Delta R\mu}$$